

УДК 523-62;523.9

## ОЧЕНЬ БОЛЬШИЕ ГЕОМАГНИТНЫЕ БУРИ В 1841–1870 гг. ПО ДАННЫМ СЕТИ РОССИЙСКИХ ГЕОМАГНИТНЫХ ОБСЕРВАТОРИЙ

© 2012 г. Н. Г. Птицына, М. И. Тясто, Б. А. Храпов

ФГБУ науки СПб филиал Института земного магнетизма, ионосферы  
и распространения радиоволн РАН, г. С.-Петербург

e-mail: nataliaptitsyna@ya.ru

Поступила в редакцию 01.06.2010 г.

После доработки 12.10.2011 г.

В работе представлен анализ больших магнитных бурь (геомагнитный индекс  $C9$  для Петербурга  $\geq 8$ , что может соответствовать  $Kp \geq 8$  или  $Dst < -200$  нТл), зарегистрированных за период 1841–1870 гг. на сети магнитных обсерваторий России: Санкт-Петербург, Екатеринбург, Барнаул, Нерчинск, Ситка и Пекин (при русском посольстве). Составлен каталог интенсивных магнитных бурь за этот период, который охватывает 9–11 циклы солнечной активности. Получены статистические характеристики больших магнитных бурь в данный исторический период. Эти результаты свидетельствуют о том, что высокая солнечная активность играла решающую роль в генерации очень интенсивных магнитных бурь в рассматриваемый период. Для этих бурь характерен только один пик в цикле солнечной активности, приходящийся на годы максимума цикла (или немного ранее): в годы около максимума солнечной активности произошло в два раза больше очень больших геомагнитных бурь, чем в менее активные периоды. В годовом распределении бурь наблюдается максимум в сентябре–октябре и дополнительный максимум в феврале. Кроме того, отмечается обратная зависимость интенсивности бурь от их длительности.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

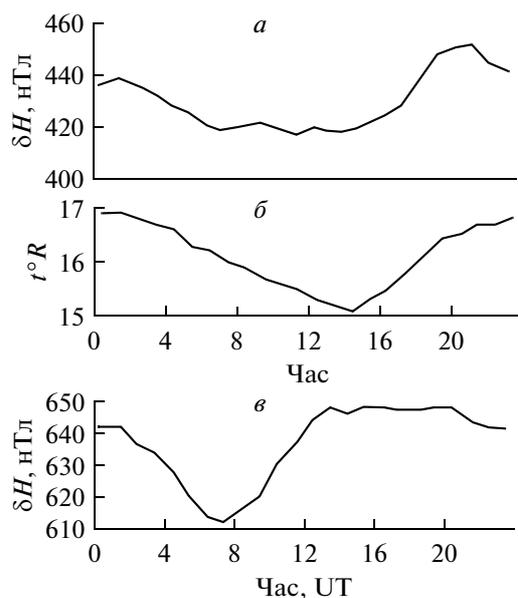
Анализ экстремальных солнечно-земных событий — очень больших магнитных бурь — важен для понимания физики магнитосферы и космической погоды с разных точек зрения. В частности, современные модели индексов геомагнитной активности и модели параметров магнитосферы были созданы на основе статистической обработки массивов данных о геомагнитном поле, скорости и плотности солнечного ветра, а также компонент вектора межпланетного магнитного поля, собранных в течение эпохи искусственных спутников Земли (с 1958 г.) (например [Akasofu et al., 1963; O'Brien and McPherron, 2000; Веселовский и др. 2004; Tsyganenko, 1996, 2002 a,b]). Для того, чтобы эти модели адекватно описывали ситуацию во время очень сильной возмущенности, необходимо исследование и учет экстремальных бурь. Кроме того, большие магнитные бури являются ключевым элементом космической погоды, и могут оказывать существенное влияние на технические системы. Они могут ухудшать радиосвязь и работу GPS, вызывать серьезные сбои в функционировании искусственных спутников Земли и в работе энергетических систем и трубопроводов (например [Lanzerotti, 1979; Iucci et al., 2005 и ссылки в них]). Однако данные о сильных и суперсильных магнитных бурях весьма ограничены, т.к. детекторы космических аппаратов плохо работают в условиях сильных возмущений.

В связи с этим растет интерес к историческим магнитным данным для поиска дополнительной информации о происходивших больших магнитных бурях. Эта историческая информация может существенно расширить наши представления о статистических характеристиках больших бурь, о возможных наихудших для земной техносферы сценариях солнечно-земных событий и т.д.

В связи с этим представляет несомненный интерес исторические магнитные данные, полученные российскими магнитологами в XIX веке.

В 2010 г. исполнилось 180 лет Российской сети геомагнитных обсерваторий, которая была заложена в 1830 году, когда к магнитным измерениям проводившимся в Санкт-Петербурге с 1726 г., добавились регулярные компонентные измерения в Екатеринбурге, Барнауле, Нерчинске, Тифлисе и Ситке. Частью этой сети были также магнитные станции в Нукусе и Пекине (при российском посольстве). Российская сеть геомагнитных обсерваторий была частью Главной Физической Обсерватории (ГФО) Горного Ведомства. Инициатором, вдохновителем и первым руководителем этого глобального проекта был академик Адольф Купфер.

Цель данной работы двоякая. Первая — это введение в научный оборот исторических данных о больших бурях за 1841–1870 гг., зарегистрированных российской геомагнитной сетью, и тем самым значительное увеличение имеющегося в настоящее время достаточно скудного экспери-



**Рис. 1.** Суточная вариация магнитного поля и температуры в Екатеринбурге (Свердловске): *а* – суточный ход  $H$ -компоненты, усредненный за август и октябрь 1841 г.; *б* – среднесуточная температура по Реомюру в августе 1841 г.; *в* – суточный ход  $H$ -компоненты, усредненный за август и октябрь 1950 г. Магнитные вариации отсчитаны от произвольного нулевого уровня, как в исходных таблицах. Отсчеты времени для (*а*) и (*б*) даны как в оригинальных таблицах.

ментального материала для исследования таких бурь. Вторая – изучение основных закономерностей больших магнитных бурь в 1841–1870 гг. по этим данным в контексте современных представлений.

## 2. ИСТОРИЧЕСКИЕ МАГНИТНЫЕ ДАННЫЕ И ПРИВЕДЕНИЕ ИХ К СОВРЕМЕННОМУ ВИДУ

**2.1. Исходные данные и их готовность для использования.** В работе проанализированы исторические данные о больших бурях, полученные в 1941–1870 гг. на сети магнитных обсерваторий России: Санкт-Петербург (географические координаты: широта  $\varphi = 59.9^\circ$ , долгота  $\gamma = 27.9^\circ$  E, геомагнитные координаты:  $\varphi_M = 56.8^\circ$ ,  $\gamma_M = 115.7^\circ$  E), Екатеринбург ( $\varphi = 56.8^\circ$ ,  $\gamma = 58.25^\circ$  E;  $\varphi_M = 49.5^\circ$ ,  $\gamma_M = 139.8^\circ$  E), Барнаул ( $\varphi = 53.3^\circ$ ,  $\gamma = 81.6^\circ$  E,  $\varphi_M = 43.9^\circ$ ,  $\gamma_M = 158.2^\circ$  E), Пекин ( $\varphi = 39.9^\circ$ ,  $\gamma = 116.3^\circ$  E;  $\varphi_M = 30.01^\circ$  N,  $\gamma_M = 187.54^\circ$  E), Нерчинск ( $\varphi = 51.3^\circ$ ,  $\gamma = 117.25^\circ$  E,  $\varphi_M = 41.15^\circ$ ,  $\gamma_M = 187.6^\circ$  E) и Ситка ( $\varphi = 57.2^\circ$ ,  $\gamma = 224.6^\circ$  E;  $\varphi_M = 60.48^\circ$  N,  $\gamma_M = 281.11^\circ$  E).

В качестве источника исходных данных мы использовали ежегодные сборники наблюдений ГФО за 1841–1870 гг. [Свод наблюдений геофизической обсерватории ...]. В таблице 1 приведена сводка наличия наблюдений на станциях российской геомагнитной сети, опубликованных в еже-

годниках. В промежуток 1865–1869 гг. данные не публиковались.

Данные ежегодников ( $H$ ,  $D$  и иногда  $Z$ ) являются часовыми значениями. Дополнительно для специальных периодов времени, согласованных с международным сообществом, проводились 5-мин измерения, а иногда во время сильного возмущения и 2.5-мин [Тясто и др., 2009].

В ежегодниках ГФО данные представлены в виде отсчетов инструментов в некий час суток в соответствии с принятым стандартом времени, приводится также цена деления. Однако эти данные не являются готовым материалом, который можно немедленно использовать для исследований. Перед их использованием эти данные необходимо привести к виду принятому и понятному в настоящее время, что связано с тем, что приборы и методика магнитных измерений, единицы измерений и стандарты времени в 19 в. были иными, чем сейчас.

**2.2. Время.** Анализ таблиц данных на предмет выявления ошибок привязки времени был произведен при помощи построения суточных кривых измеряемых компонент вектора магнитного поля Земли и сравнения с современным суточным ходом. Для дополнительного контроля использовался ход температурных кривых, построенных по данным, приведенным в тех же ежегодниках. Сразу отметим, что вид суточных вариаций, построенных по данным ежегодников в разные годы различен, что свидетельствует об использовании различных стандартов времени.

На рисунке 1 показан пример нашего анализа для 1841 г. На этом рисунке приведен суточный ход  $H$ -компоненты магнитного поля (рис. 1*а*) и температуры в Екатеринбурге (рис. 1*б*) согласно оригинальным данным [Annuaire ..., 1843]. Кривая 1*в* демонстрирует суточный ход  $H$ -компоненты в современную эпоху в рамках современного стандарта времени UT (1950 г.). Суточные кривые на рис. 1*а* и 1*в* отличаются друг от друга. Анализ температурной кривой показывает минимальную температуру в 14–17 ч., что свидетельствует о том, что в данном случае используется астрономическое время, в котором сутки начинаются в полдень. Кроме того, видно, что она перевернута по отношению к суточному ходу магнитной вариации на рис. 1*в*. Т.е. в данном случае при измерении горизонтальной компоненты магнитного поля рост значений отсчета магнитного инструмента означал убывание поля. Тогда получившийся минимум будет сдвинут относительно минимума кривой на рис. 1*в* на  $\sim 1.5$  ч. Это как раз то  $dt = GT - UT$ , на которое отличаются геттингенское время GT от современного мирового времени UT. Таким образом, можно сделать вывод, что в 1841 г. на станции Екатеринбург использовалось геттингенское астрономическое время.

Таблица 1. Наличие данных российской геомагнитной сети, опубликованных в ежегодниках ГФО

Годы	Обсерватории						
	С-Пет	Екат	Барн	Нерч	Ситка	Пекин	Казань
	Компонент поля						
	<i>HDZ</i>	<i>HDZ</i>	<i>HDZ</i>	<i>HDZ</i>	<i>HDZ</i>	<i>HDZ</i>	<i>HDZ</i>
1841	<i>HDZ</i>	<i>HDZ</i>	<i>HDZ</i>	<i>HDZ</i>			<i>HDZ</i> *
1842	<i>HD</i>	<i>HD</i>	<i>HD</i>	<i>HD</i>	<i>HD</i>		
1843	<i>HD</i>	<i>HD</i>	<i>HD</i>	<i>HD</i>	<i>HD</i>		
1844	<i>HD</i>	<i>HD</i>	<i>HD</i>	<i>HD</i>	<i>HD</i>		
1845	<i>HD</i>	<i>HD</i>	<i>HD</i>	<i>HD</i>	<i>HD</i>		
1846	<i>HD</i>	<i>HD</i>	<i>HD</i>				
1847	<i>HD</i>	<i>HD</i>	<i>HD</i>	<i>HD</i>	<i>HD</i>		
1848	<i>HD</i>	<i>HD</i>	<i>HD</i>	<i>D</i>	<i>HD</i>		
1849	<i>HD</i>	<i>HD</i>	<i>HD</i>	<i>HD</i>	<i>HD</i>		
1850	<i>HD</i>	<i>HD</i>	<i>HD</i>	<i>HD</i>	<i>HD</i>	<i>HD</i>	
1851	<i>HD</i>	<i>HD</i>	<i>HD</i>	<i>HD</i>	<i>HD</i>	<i>HD</i>	
1852	<i>HD</i>	<i>HD</i>	<i>HD</i>	<i>HD</i>	<i>HD</i>	<i>HD</i>	
1853	<i>HD</i>	<i>HD</i>	<i>HD</i>	<i>HD</i>		<i>HD</i>	
1854	<i>HD</i>	<i>HD</i>	<i>HD</i>	<i>HD</i>		<i>HD</i>	
1855	<i>HD</i>	<i>HD</i>	<i>HD</i>	<i>HD</i>		<i>HD</i>	
1856	<i>HD</i>	<i>HD</i>	<i>HD</i>	<i>HD</i>	<i>HD</i>		
1857	<i>HD</i>	<i>HD</i>	<i>HD</i>	<i>HD</i>	<i>D</i>		
1858	<i>HD</i>	<i>HD</i>	<i>HD</i>	<i>HD</i>	<i>D</i>		
1859	<i>HD</i>	<i>HD</i>	<i>HD</i>	<i>HD</i>	<i>D</i>		
1860	<i>HD</i>	<i>HD</i>	<i>HD</i>	<i>HD</i>	<i>HD</i>		
1861	<i>HD</i>	<i>HD</i>	<i>HD</i>	<i>HD</i>	<i>D</i>		
1862	<i>HD</i>	<i>HD</i>	<i>HD</i>	<i>HD</i>	<i>D</i>		
1863		<i>HD</i>	<i>HD</i>	<i>HD</i>	<i>D</i>		
1864		<i>HD</i>	<i>HD</i>	<i>HD</i>	<i>D</i>		
1865							
1866							
1867							
1868							
1869							
1870	<i>HDZ</i>						

Примечание: \*Наблюдения *H*, *D*, *Z* через каждые два часа.

Такой анализ был проделан для всех станций и для всех тех лет, когда наблюдались исследуемые бури. В результате этого анализа выяснилось, что с 1841 г. по 1852 г. в Сводах использовалось геттингенское астрономическое время, для бури 1859 г. и далее – местное астрономическое время, а для бури 1970 г. – местное время.

2.3. *Абсолютные измерения.* В исторических оригинальных таблицах и публикациях данные представлены в виде относительных единиц, отсчитываемых от произвольного уровня. Для пере-

вода отсчетов в нТл, необходимо знать абсолютные значения поля и коэффициенты пересчета, которые приведены в работе [Тясто, 2009]. Результаты ретроспективного анализа по поиску абсолютных значений магнитного поля в исследуемый период времени приведены в табл. 2. Для некоторых лет представлены среднегодовые значения поля, для других – единичные измерения.

2.3. *Погрешности и ошибки измерений.* При измерении горизонтальной компоненты магнитного поля убыванию *H* могло быть приписано

Таблица 2. Абсолютные значения  $H$ -компоненты (нТл)

Год	Обсерватории					
	Санкт-Петербург	Екатеринбург	Барнаул	Нерчинск	Пекин	Ситка
1841	16581	18400	—	22170	—	—
1842	16538	—	—	—	—	—
1843	16653	—	20542	22135	—	14663
1844	16585	18398	20727	22035	—	—
1845	16599	18493	—	—	—	—
1847	16399	—	—	—	—	—
1850	—	18070	—	—	—	—
1860	—	18040	—	—	—	—
1861	16400	—	—	—	—	—
1869	—	—	—	—	28443	—
1870	16280	—	—	—	28433	—

уменьшение значений отсчета магнитного инструмента или, наоборот, возрастание. Кроме того, обычно в таблицах приводилось восточное склонение  $D$ , но в некоторые годы на некоторых станциях использовалось западное склонение. Рис. 1а иллюстрирует такую ситуацию. Поэтому механическое использование отсчетов, данных в Сводах, может привести к ошибкам в тех случаях, когда отсутствует или неправильно указано направление измерений. Совместный анализ хода суточных кривых магнитных элементов, полученных с непосредственным использованием данных Сводов, и их сравнение с известными характеристиками суточных кривых на обсерваториях позволило найти и откорректировать такие ошибки в Сводах.

Что касается собственно ошибок измерения магнитного поля Земли и его вариаций, то в рассматриваемый период времени согласно [Рыкачев, 1899] они были довольно значительны и могли достигать 150 нТл, затем они уменьшились до 50 нТл. Наш анализ показывает, что суточный ход с амплитудой  $\approx 25\text{--}30$  нТл хорошо заметен даже для самых ранних наблюдений в 1841 г. (рис. 1а). Из этого следует, что ошибки могли носить систематический характер, и тогда это неважно для исследования вариаций, или что ошибки измерения, указанные в [Рыкачев, 1899], преувеличены.

### 3. КРИТЕРИЙ ОТБОРА БУРЬ

Для выявления больших бурь мы опирались на список среднесуточных геомагнитных индексов  $S9_{\Pi}$  для Санкт-Петербурга [Зосимович, 1981] и дополнительный анализ исторических магнитных данных из ежегодников. Критерием отбора периодов очень большой возмущенности были выбраны дни с  $S9_{\Pi} = 8$  и 9.

Среднесуточный планетарный индекс  $S9$  [Бартельс, 1951] является 10-балльным индексом (0–9) и базируется на трехчасовом индексе  $Kp$ . Индекс  $S9$  определяется как алгебраическая разность  $R$  между наибольшим и наименьшим отклонениями одной из трех магнитных составляющих, амплитуда которой в данном периоде (трехчасовом или суточном) максимальна. Затем используется шкала соответствия  $R$  и  $K$ . Для широты Санкт-Петербурга амплитудные границы выбраны так, чтобы геомагнитные индексы, полученные для Санкт-Петербургской обсерватории, соответствовали индексам обсерваторий, лежащих на других геомагнитных широтах и характеризующихся различной геомагнитной возмущенностью. В основу индекса  $S9_{\Pi}$  для Санкт-Петербурга была положена шкала для обсерватории Нимек [Зосимович, 1981] для определения  $Kp$  индекса. Для Санкт-Петербурга индекс  $S9_{\Pi} = 8$  соответствует  $R$  лежащему в границах от 400 до 600 нТл, а  $S9_{\Pi} = 9$  соответствует  $R > 600$  нТл. Эти же границы определяют локальный  $K$ -индекс для Санкт-Петербургской обсерватории. Как показали исследования [Бенькова, 1940; Зосимович и Андриенко 1971], индексы, полученные по записям Санкт-Петербургской (и позднее Павловской) обсерватории, объективно отражают планетарные вариации геомагнитной возмущенности. Таким образом, в первом приближении можно считать, что  $S9_{\Pi} = 8$  и 9 соответствуют  $Kp = 8$  и 9.

Для того, чтобы выяснить соотношение классификации бурь отобранных нами по индексу  $S9_{\Pi}$ , с классификацией по другим индексам, воспользуемся данными [Loewe and Prolss, 1997]. В таблице 3 приведена классификация интенсивных магнитных бурь, зарегистрированных в 1957–1993 гг., в соответствии с различными ин-

**Таблица 3.** Классификация интенсивных магнитных бурь [Loewe and Prolss, 1997]

Класс	Число	%	$Dst$ , нТл	$\langle Dst \rangle$	$\langle ap \rangle$	$\langle Kp \rangle$	$\langle AE \rangle$ , нТл
Strong	206	19	-100...-200	-131	111	7-	849
Severe	45	4	<-200	-254	236	8+	1017
Great	6	1	<-350	-427	300	9-	1335

дексами геомагнитной активности согласно [Loewe and Prolss, 1997].

Видно, что бури с  $C9_{II} = 8$  и 9 (или в первом приближении  $Kp = 8$  и 9) попадают в категорию очень сильных (“severe” и “great”) магнитных бурь. Для таких бурь можно полагать границей  $Dst < -200$  и  $Ap > 200$ .

Наличие магнитного возмущения и его планетарный характер, проверялись по данным магнитных наблюдений на всех станциях Российской сети ( $\Delta\gamma \approx 170^\circ$ ).

#### 4. РЕЗУЛЬТАТЫ

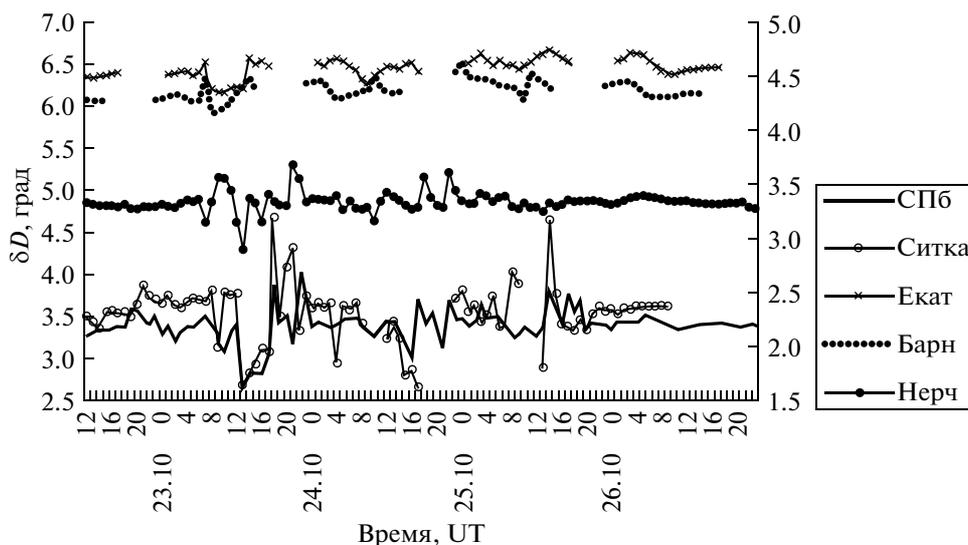
**4.1 Примеры исторических бурь.** На рисунках 2–4 показаны примеры магнитных бурь, зарегистрированных станциями российской геомагнитной сети в периоды 22–26 октября 1847 г. ( $D$ -компонента), 20–23 февраля 1848 г. ( $D$  и  $H$ -компонента) и 18–21 февраля 1852 г. ( $H$ -компонента). Вариации отсчитаны от произвольного нулевого уровня, как это дано в исходных таблицах.

На рисунке 2 прослеживаются три возмущенных периода, произошедшие в течение 22–26 октября 1847 г. с интервалом около суток. Самое интенсивное ( $C9_{II} = 9$ ) первое магнитное возмущение

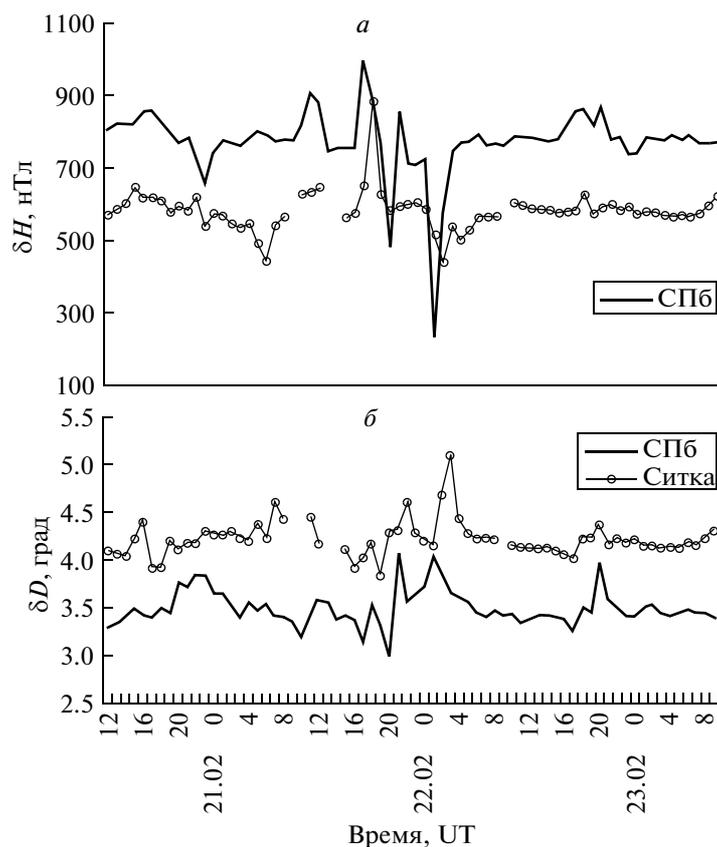
наиболее четко видно на станциях Санкт-Петербург, Ситка и Нерчинск, для которых 23 октября  $RD$  было соответственно  $1.4^\circ$ ,  $2^\circ$  и  $1^\circ$ . Видно, что наибольшие возмущения были зафиксированы на станции Ситка. В Екатеринбурге и Барнауле эта буря прослеживается, однако амплитуда возмущения была меньше.

На рисунке 3 представлены вариации  $H$  и  $D$  компонент магнитного поля на станциях Санкт-Петербург и Ситка в течение 20–23 февраля 1848 г. Кривые вариаций на станциях очень похожи. В Санкт-Петербурге максимальная вариация  $H$ -компоненты 21 февраля достигла 784 нТл, а  $RD = 1.1^\circ$ . В Ситке в тот же период времени максимальная вариация  $H = 441$  нТл,  $RD = 1.3^\circ$ .

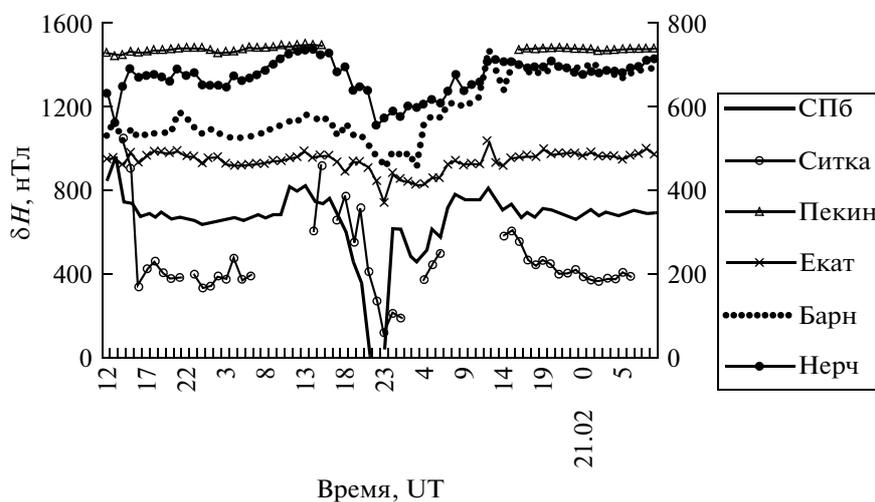
Вариации магнитного поля в феврале 1852 г. (рис. 4) демонстрируют типичную депрессию  $H$ -компоненты во время бури на всех станциях. Наибольшие возмущения  $H$ -компоненты наблюдались на двух наиболее высокоширотных станциях, Санкт-Петербург и Ситка. В момент наибольшего возмущения на станции Санкт-Петербург (19.02 в 23 UT) инструмент “зашкалило”, что лишает нас возможности указать точную амплитуду возмущения. Видно, что она более 819 нТл. Примерно такая же картина наблюдается и на станции Сит-



**Рис. 2.** Вариации  $D$ -компоненты, зарегистрированные 22–26 октября 1847 г. обсерваториями российской магнитной сети. Вариации отсчитаны от произвольного нулевого уровня, как в исходных таблицах. Правая ось ординат относится к станциям Екатеринбург, Барнаул и Нерчинск.



**Рис. 3.** Вариации магнитного поля, зарегистрированные 20–23 февраля 1848 г. на магнитных обсерваториях Санкт-Петербург и Ситка; а –  $H$ -компонента; б –  $D$ -компонента. Вариации отсчитаны от произвольного нулевого уровня как в исходных таблицах.



**Рис. 4.** Вариации  $H$ -компоненты, измеренной 18–21 февраля 1852 г. станциями российской магнитной сети. Вариации отсчитаны от произвольного нулевого уровня, как в исходных таблицах. Правая ось ординат относится к станциям Екатеринбург, Барнаул и Нерчинск.

ка, здесь тоже можно определить только, что амплитуда вариации  $H$ -компоненты была более 780 нТл.

Видно, что кривые вариаций на различных обсерваториях согласуются между собой, свиде-

тельствую тем самым о достаточной надежности данных российской магнитной сети.

4.2 Каталог больших магнитных бурь за 1841–1870 гг. Данные обо всех сильнейших бурях, заре-

**Таблица 4.** Каталог больших бурь в 1841–1870 гг. по данным российской магнитной сети

№ п/п	Год	Начало день, месяц	Начало Час, УТ	День max возмущения	$\Delta T$ Час, УТ	$RH$ нТл	$RD$ град, мин.	$RZ$ нТл	$C9_{II}$	$W$
1	1841	24.09	17	25.09	64	>771	1 16.33	638	9	36.5
2	1847	24.09	01	24.09	40	>1043	1 56.24	—	9	160.9
3	1847	23.10	06	23.10	30	>816	1 23.63	—	9	180.4
4	1847	24.10	12	24.10	56	>854	0 48.43	—	9	180.4
5	1848	20.02	21	21–22.02	53	784	1 04.52	—	9	111.8
6	1848	17.11	08	17–18.11	80	>660	1 27.92	—	9	114.6
7	1851	06.09	21	07.09	38	899	1 25.91	—	9	67.9
8	1852	19.02	09	19.02	31	>819	1 46.69	—	9	66.4
9	1859	28.08	09	28–29.08	52	>462	0 42.82	—	8	106.8
10	1859	02.09	04	02.09	5	>980	3 08.48	—	9	105.8
11	1859	02.09	11	02.09	21	>700	1 23.72	—	9	105.8
12	1860	05.07	0	05.07	45	663	0 52.90	—	9	116.7
13	1862	02.10	15	03–04.10	54	716	1 27.97	—	9	41.9
14	1862	06.10	04	06.10	32	587	0 39.66	—	8	41.9
15	1870	24.10	07	25.10	28	513	2 03.1	436	8	146.4
16	1870	25.10	11	26.10	33	457	1 27.9	>378	8	146.4

гистрированных на магнитных обсерваториях российской сети с 1 января 1841 по 31 декабря 1870 года были проанализированы и сведены в единый каталог (таблица 4). За 1865–1869 гг. данные отсутствуют. Таким образом, список охватывает 25 лет наблюдений. За это время российскими станциями было зарегистрировано 16 бурь, для которых  $C9_{II} = 8$  или 9.

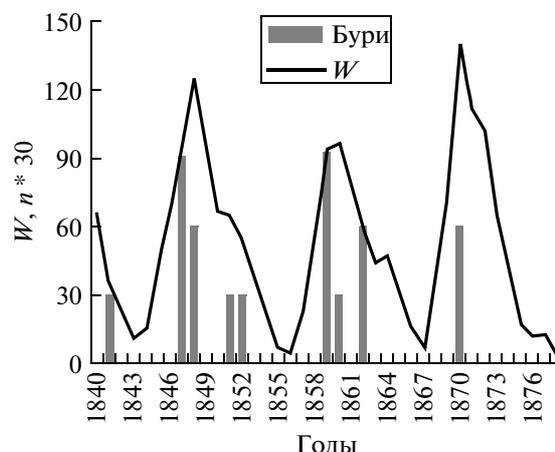
Таблица 4 содержит сведения о времени начала бури, ее длительности  $\Delta T$  (время от начала бури до ее окончания), а также главного дня (или периода) возмущенности. Эти параметры определялись при анализе данных всех магнитных обсерваторий российской сети. В нашем списке приведены единые для всех обсерваторий моменты начала бурь. Эта особенность нашего каталога является важной, поэтому мы подчеркиваем ее.

Обычно окончанием бури считается время, когда поле ( $H$ -компонента) возвращается к уровню, которое было до начала бури (например [Яновский, 1978; Green and Boardsen, 2006; Pandey and Dubey, 2009]). В соответствии с этим мы считали моментом окончания бури тот, когда поле возвращалось к уровню в спокойный день перед бурей, и затем оставалось квазипостоянным, по крайней мере, в течение 2–3-х часов на всех станциях. В каталог включены также размах колебаний  $H$ ,  $D$  и  $Z$  компонент ( $RH$  и  $RD$  и  $RZ$ ) по данным магнитной обсерватории Санкт-Петербург. В последних двух графах приведены геомагнитные индексы  $C9_{II}$  для главного дня бури и средние для месяца бури числа Вольфа  $W$ .

Для составления таблицы 4 использовались данные часовых значений, а также результаты 5-

мин измерений. К сожалению, по 5-мин данным для большинства бурь невозможно определить начальные моменты бури более точно, чем по часовым таблицам, так как эти измерения начинались уже после того, как наблюдатели видели, что магнитное поле является сильно возмущенным. Поэтому в таблице 4 указаны начала бурь по часовым таблицам.

Отметим, что бури № 3 и 4, 10 и 11, а также 15 и 16 являются частью серий из нескольких бурь, разнесенных на различное время, в среднем ~сутки, но иногда меньше, как например, для бурь № 15 и 16 [Тясто, 2009]. В нашем списке указаны только те возмущения, для которых  $C9_{II} \geq 8, 9$ .



**Рис. 5.** Распределение среднегодовых чисел Вольфа  $W$  и числа  $n$  очень больших бурь в течение 1841–1870 гг. Столбцы — количество бурь в году  $n \times 30$ .

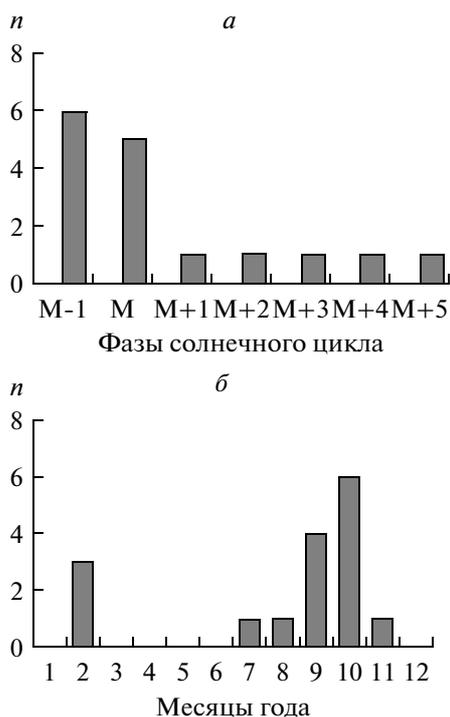


Рис. 6. Распределение числа  $n$  очень больших бурь.  $a$  — по отношению к году максимума в цикле солнечной активности  $M$ ;  $b$  — в течение года.

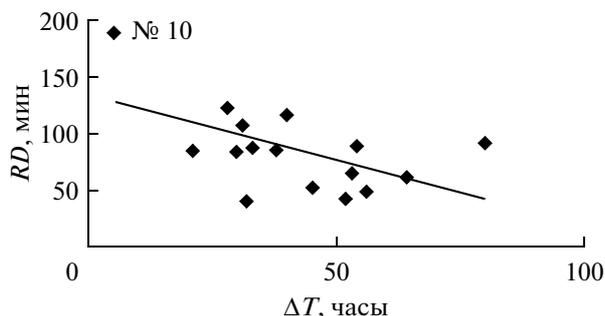


Рис. 7. Связь размаха амплитуд  $D$ -компоненты магнитного поля  $RD$  во время бури с длительностью бурь  $\Delta T$ .

**4.3. Некоторые статистические закономерности.** По данным нашего каталога (табл. 4) был проведен анализ очень возмущенной геомагнитной активности в период 1841–1870 гг. Этот период захватывает конец 8-го, 9–10 циклы и год максимума 11-го цикла солнечной активности. Рисунок 5 демонстрирует распределение очень больших бурь и солнечных пятен  $W$  в 1841–1870 гг. За рассматриваемый период времени солнечные минимумы были в 1843, 1856 и 1867 гг., а максимумы в 1848, 1860 и 1870 гг. Видно, что очень большие бури распределены неравномерно в цикле солнечной активности. Наибольшее количество бурь наблюдалось в 1847–1848 гг. в 1859–1860 гг. и в 1870. В годы минимумов не зарегистрировано ни одной

большой бури. Этот факт подтверждается при анализе данных всех станций.

На рисунке 6а представлена диаграмма распределения очень больших бурь по отношению к году максимума  $M$  цикла солнечной активности. Из рисунка видно, что 5 бурь произошли в годы максимальной солнечной активности, 6 бурь за год до максимума и остальные 5 бурь распределены равномерно на спаде солнечного цикла (по одной буре в год). Таким образом, максимальное количество больших бурь (11 из 16, то есть 70%) приходится на период максимальной солнечной активности. Это говорит о том, что высокая солнечная активность играла решающую роль в генерации очень интенсивных магнитных бурь в 1841–1870 гг. Для этих бурь характерен один максимум в цикле солнечной активности, приходящийся на годы максимума цикла (или немного ранее).

Рисунок 6б демонстрирует распределение очень больших бурь в течение года. Видно, что бури распределены неравномерно внутри года, 13 из 16 бурь зарегистрированы во второй половине года. Наблюдается два максимума появления очень больших бурь в годовом распределении. Основной максимум приходится на сентябрь и октябрь, т.е. на период, близкий осеннему равноденствию. Дополнительный максимум, гораздо меньший по величине, наблюдается в феврале.

Далее мы попытались проверить наличие связи интенсивности бури с ее длительностью. Поскольку для большинства бурь можно указать лишь нижнюю границу возмущения  $H$ -компоненты магнитного поля, то для характеристики интенсивности бури мы воспользовались значениями максимального размаха амплитуд  $D$ -компоненты  $RD$  во время наиболее активного дня/периода. На рисунке 7 показана корреляция  $RD$  с длительностью бурь  $\Delta T$ . Видно, что наблюдается четкая зависимость интенсивности бури от ее длительности:  $RD$  уменьшается с ростом продолжительности бури. При этом коэффициент корреляции достаточно высок,  $K = -0.56$ . При сравнении  $RD$  с длительностью главной фазы бури (не приведено здесь) такой связи не обнаружено. Если исключить из нашей выборки две экстремальные бури с максимальной и минимальной длительностью (буря № 10, Кэррингтоновская буря в сентябре 1859 г., и буря № 6 в ноябре 1848 г.), то найденная обратная зависимость между интенсивностью и длительностью бури сохраняется ( $K = 0.48$ ).

## 5. ДИСКУССИЯ И ВЫВОДЫ

В данной работе мы исследовали сильнейшие бури в 1841–1870 гг., зарегистрированные на сети магнитных обсерваторий России. Предварительно мы провели анализ возможных ошибок и неточностей в оригинальных таблицах и их коррекцию. Кроме того, проведена трансформация тех

значений магнитного поля и времени считывания информации, которые приводятся в исторических документах, к виду принятому в настоящее время.

Наши данные об очень интенсивных бурях, зарегистрированных на российской геомагнитной сети, заполняют пробел, существующий в отношении экстремальной геомагнитной активности до 1868 г. Самым длинным рядом геомагнитной активности является планетарный индекс  $aa$ , на который можно опираться при составлении каталогов бурь. Этот индекс доступен лишь с 1868 г. Существует несколько списков больших геомагнитных бурь в XIX в., которые базируются на каталогах магнитных возмущений по данным отдельных обсерваторий. В частности, в работе [Tsurutani et al., 2003] приведен хронологический список больших бурь. Но этот список начинается лишь с 1872 г., а для более раннего времени приведена лишь буря в сентябре 1859 г. Напротив, в списке бурь, который был составлен Willis et al., [1997] с использованием индекса  $ak$  для обс. Хельсинки [Nevanlinna, 1995], буря 2–3 сентября 1859 г. вообще не нашла отражения.

Наши результаты свидетельствуют о том, что высокая солнечная активность играла решающую роль в генерации очень интенсивных ( $C9_{\text{H}} \geq 8$ , что может соответствовать  $Kp \geq 8$  или  $Dst < -200$  нТл) магнитных бурь в 1841–1870 гг. Для нашего собрания бурь характерен только один максимум в солнечном цикле. Этот максимум числа бурь приходится на годы вблизи максимума солнечной активности (или немного ранее). При этом ни одной интенсивной бури не было зафиксировано в годы минимума солнечной активности.

Статистические исследования распределения бурь в цикле солнечной активности для других, более поздних, периодов времени приводят авторов к разноречивым результатам. Cliver et al., [1998, 2002] проанализировали возмущения геомагнитной активности с индексом  $aa^* > 40$  нТл с 1868 по 2000 г. и нашли, что такие бури распределены равномерно по всем фазам солнечного цикла. И действительно, можно найти примеры больших бурь произошедших в периоды минимума солнечной активности. Например, буря 31 августа 1943 г. ( $Kp = 8$ ) зарегистрирована за 6 месяцев до минимума, а буря 26 марта 1976 г. ( $Kp = 8$ ) случилась как раз в месяц минимума цикла. Bell et al., [1997] показали, что супербури ( $Dst < -250$  нТл) в течение 1932–1995 гг. встречались чаще на спаде солнечного цикла. В работах [Gonzalez et al., 1990; 1993] для бурь с  $Dst < -50$  нТл, наблюдавшихся в 20 и 21 циклах (1965–1985), найдено наличие двух максимумов в цикле солнечной активности: один максимум таких бурь приходится на максимум солнечной активности, а второй максимум приходится на последние годы спада цикла.

В связи с тем, что магнитные бури могут вызываться различными процессами в цепочке Солнце–межпланетная среда–магнитосфера–геомагнитное поле, то и характерные особенности бурь и их поведение в цикле солнечной активности зависит от физических процессов, протекающих в каждом звене этой цепочки, от индивидуальных “драйверов” исследуемых бурь [Ермолаев и Ермолаев, 2001; 2002; Ермолаев и др., 2010]. Большие магнитные бури ( $Dst < -100$  нТл) могут являться ответом магнитосферы на быстрый, высокоинтенсивный коротитирующий поток [Richardson et al., 2006]. Интенсивные бури могут вызываться уединенными потоками с выраженными сверхзвуковыми ударными волнами. Считается, что основной причиной геомагнитной бури является длительные периоды существования южной компоненты межпланетного магнитного поля ММП, которое пересоединяется с магнитным полем Земли и позволяет солнечной энергии проникать в земную магнитосферу (например, [Tsurutani et al., 1988]). С этой точки зрения наличие двойного максимума в распределении бурь в цикле солнечной активности, полученное в работах [Clua de Gonzalez et al., 1990; 1993], авторы вполне логично связывают с аналогичным распределением длительных периодов существования отрицательной  $B_z$  компоненты межпланетного магнитного поля большой амплитуды, наблюдавшемся в интервале 1970–1981 гг. Согласно [Burlaga et al., 1981; Klein и Burlaga, 1982; Wilson, 1990] носителями долгоживущих периодов сильной южной компоненты ММП являются магнитные облака.

Wu and Lepping [2006], исследуя зарегистрированные в 1965–1998 гг. бури, вызванные межпланетными магнитными облаками, показали, что такие бури в периоды высокой солнечной активности встречаются в два раза чаще, чем в периоды низкой активности. В работе [Ермолаев and Ермолаев, 2008] было показано, что наиболее сильные бури генерируются последовательностью взаимодействующих магнитных облаков. В свете этих результатов представляется вероятным, что очень большие бури нашего каталога, которых в годы около максимума солнечной активности произошло в два раза больше, чем в менее активные периоды, были в основном вызваны именно приходом межпланетных магнитных облаков.

Вероятно, в пользу этого свидетельствует и найденная нами обратная связь интенсивности бурь (размах  $D$ ) и их длительности  $\Delta T$  (коэффициент корреляции  $K = -0.54$ ) для исследуемых очень сильных магнитных бурь. В работе [Бархатов и др., 2008] на основе модели конкретного плазменного выброса показано, что длительность фаз магнитных бурь и их амплитудные характеристики зависят от траектории прохождения магнитосферы через магнитное облако, и, в частности, от длины траектории; однако конкретные детали

связи зависят от многих межпланетных параметров. С другой стороны, статистический анализ очень сильных бурь ( $Dst < \sim 200$  нТл) за период 1998–2005 гг., проведенный Verma et al., [2009], выявил, что амплитуда таких бурь очень четко коррелирует обратным образом ( $K = -0.69$ ) с размерами магнитного облака, которое вызвало бурю. Если большинство исследуемых нами бурь (1841–1870 гг.) вызвано магнитными облаками, то обратная корреляция между амплитудой бури и ее длительностью согласуется с результатами работы [Verma et al., 2009] при предположении, что длительность магнитной бури прямо пропорциональна размерам облака, ответственного за бурю.

Наш анализ годового распределения очень больших бурь в 1841–1870 гг. показал, что для них характерны два максимума в годовом распределении. Основной максимум наблюдается вблизи осеннего равноденствия (сентябрь–октябрь). Дополнительный максимум отмечается в феврале. Следует заметить, что полугодовая волна в геомагнитной активности с двумя максимумами в периоды равноденствий известна уже более 100 лет [Cortie, 1912; Chapman and Bartels, 1940]. Позднее этот эффект исследовался многими авторами и было предложено несколько механизмов для его объяснения [Murayama, 1974; Svalgaard, 1977; Schreiber, 1998; Cliver et al., 2000; Svalgaard et al., 2002; Petrukovich and Zakharov, 2007]. Наиболее популярной является гипотеза Russell-McPherron [Russell and McPherron, 1973] о том, что геомагнитная активность максимальна, когда межпланетное магнитное поле имеет максимальную южную составляющую в солнечно-магнитосферной системе координат, что происходит в периоды равноденствия. Однако в недавней работе Clua de Gonzales et al. [2002] при исследовании годового распределения возмущенных дней на основе статистического анализа различных индексов геомагнитной активности в течение последних 12 солнечных циклов получено, что такое стандартное распределение с максимумами в периоды равноденствия характерно скорее для слабых и умеренно сильных бурь. Что же касается интенсивных бурь ( $Ap > 100$ ), то для них согласно работе [de Gonzales et al., 2002] появляются дополнительные максимумы в июле и ноябре. Большие бури, которые представлены в нашем списке, не показывают таких особенностей. Наши результаты скорее согласуются с данными работы [Crooker et al., 1992], где при анализе больших бурь ( $Ap > 100$ ) за 1932–1989 гг. было получено распределение с двумя максимумами в периоды равноденствий в марте и сентябре.

В заключение следует отметить, что данные сети российских геомагнитных обсерваторий уникальны как по долготе охвата территории от Санкт-Петербурга до Аляски, так и по однородности данных. Особую ценность этим данным придает то обстоятельство, что измерения на всех

станциях проводились одинаковыми инструментами и по одной и той же методике. Ранее мы провели детальный анализ данных российской магнитной сети для знаменитой Кэррингтоновской бури в сентябре 1859 г. [Тясто и др., 2009], который продемонстрировал высокую согласованность данных всех российских обсерваторий не только между собой, но и с данными измерений в обсерваториях Кью и Бомбее. Результаты настоящей работы показывают, что и для всех остальных бурь, наблюдавшихся в течение 1841–1870 гг., данные всех станций согласованы между собой, что свидетельствует о достаточной надежности исторических магнитных измерений на российских обсерваториях. Представленный каталог очень больших магнитных бурь, зарегистрированных на российской геомагнитной сети в период 1841–1870 гг., значительно расширяет существующую базу данных об экстремальных солнечно-земных событиях.

Авторы благодарны заведующему Магнитной обсерватории СПбИЗМИРАН В.А. Кошелевскому и сотрудникам библиотеки Русского Географического Общества за предоставленные материалы и документы.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бархатов Н.А., Калинина Е.А., Левитин А.Е. и др. Зависимость интенсивности и продолжительности магнитных бурь от траектории прохождения магнитного облака через земную магнитосферу // Солнечно-земная физика. Т. 1. Вып. 12. С. 148–149. 2008.
- Веселовский И.С., Панасюк М.И., Авдюшин С.И. и др. Солнечные и гелиосферные явления в октябре–ноябре 2003 г.: причины и следствия // Космич. исслед. Т. 42. С. 453–508. 2004.
- Бенькова Н.П., Калинин Ю.Д. Каталог магнитных бурь Службой магнитной обсерватории // Космич. данные. Декадный обзор. №126–128. Гидрометеоиздат. 1941.
- Ермолаев Ю.И., Ермолаев М.Ю. О некоторых статистических взаимосвязях солнечных, межпланетных и геомагнитосферных возмущений в период 1976–2000 гг. // Космич. исслед. Т. 41. № 6. С. 574–584. (Cosmic Research P. 574–584). 2003.
- Ермолаев Ю.К., Николаева Н.С., Лодкина И.Г., Ермолаев М.Ю. Относительная частота появления и геоэффективность крупномасштабных типов солнечного ветра // Космич. исслед. Т. 48. № 1. С. 3–32. 2010.
- Зосимович И.Д. Геомагнитная активность и устойчивость корпускулярного поля Солнца. М.: Наука, 191 с. 1981.
- Зосимович И.Д., Андриенко Д.А. Некоторые статистические характеристики геомагнитной активности // Проблемы космической физики. № 7. С. 61. 1972.
- Рыкачев М.А. Исторический очерк Главной физической обсерватории за 50 лет ее деятельности, ч. I. Санкт-Петербург: Изд. Императорской Акад. наук, 1899.
- Свод наблюдений, произведенных в Главной Физической и подчиненных ей обсерваториях, под руководством академика А. Купфера за 1848 г. Санкт-Петербург: Изд. А. Якобсона, 1851.

- *Тясто М.И., Птицына Н.Г., Веселовский И.С., Яковчук О.С.* Экстремально сильная геомагнитная буря 2–3 сентября 1859 года по архивным магнитным данным российской сети наблюдений // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 49. № 2. С. 163–168. 2009.
- *Яновский Б.М.* Земной магнетизм. Ленинград: Изд. ЛГУ, С. 592. 1978.
- *Akasofu, S.-I., Chapman S., Venkatesan D.* The Main Phase of Great Magnetic Storms // J. Geophys. Res. V. 68(11). P. 3345–3350. 1963.
- *Annales de l'Observatoire Physique Central de Russie*, Ed. A.T. Kupffer. Annee 1847. St.-Petersbourg: l'Imprimerie de A. Jacobson. 1850.
- *Annuaire Magnetique et Meteorologique du Corps des Ingenierus des Mines de Russie*, Annee 1841. Ed. A.T. Kupffer. St.-Petersbourg: l'Imprimerie de A. Jacobson. 1843.
- *Bartels J.* The technique of scaling indices K and Q of geomagnetic activity // Ann. Intern. Geophys. V. 4. 215–226. 1957.
- *Bell J.T., Gussenhoven S., Mullen E.G.* Super storms // J. Geophys. Res. V. 102. P. 14189–14198. 1997.
- *Burlaga L.F., Sittler E., Mariani F., Schwenn R.* Magnetic loop behind an interplanetary shock: Voyager, Helios and IMP-8 observations // J. Geophys. Res. V. 86. 6673–6692. 1981.
- *Clilverd M.A., Clark T.D., Clarke E., Rishberth H.* Increased magnetic storms activity from 1868 to 1995 // J. Atmos. Solar–Terr. Phys. V. 60. P. 1047–1056. 1998.
- *Clilverd M.A., Clark T.D.G., Clarke E., Rishberth H., Ulich T.* The causes of long-term change in the aa index // J. Geophys. Res. V. 107. XXXX, doi:10.1029/2001JA000501. 2002.
- *Cliver E., Kamide Y., Ling A.* Mountains versus valleys: Semiannual variation of geomagnetic activity // J. Geophys. Res. V. 106. P. 2413. 2000.
- *Clua de Gonzalez A.L., Silbergleit V.M., Gonzalez W.D., Tsurutani B.T.* Irregularities in the semiannual variation of the geomagnetic activity // Adv. Space Res. V. 30. Issue 10. P. 2215–2218. 2002.
- *Gonzalez W.D., Tsurutani B.T., Clua de Gonzalez A.L.* Interplanetary origin of geomagnetic storms // Space Sci. Rev. V. 88. P. 529–539. 1999.
- *Cortie A.L.* Sunspots and terrestrial magnetic phenomena, 1898–1911 // Mon. Not. R. Astron. Soc. V. 73. P. 52–60. 1912.
- *Crooker N.U., Cliver E.W., Tsurutani B.T.* The semiannual variation of great geomagnetic storms and the post-shock Russell-McPherron effect preceding coronal mass ejecta // Geophys. Res. Lett. V. 19(5). P. 429–441. 1992.
- *Green J.L., Boardsen S.A.* Duration and extent of the great auroral storm of 1859 // Adv. Space Res., doi:10.1016/j.asr.2005.08.054. 2006.
- *Iucci N., Levitin A.E., Belov A.V., Eroshenko E.A., Ptitsyna N.G., Villaresi G., Chizhenkov G.V., Dorman L.I., Parisi M., Tyasto M.I., Yanke V.G.* Space Weather Conditions and Spacecraft Anomalies in Different Orbits // Space weather V. 3, S01001, doi:10.1029/2003SW000056. 2005.
- *Klein L.W., Burlaga L.F.* Magnetic clouds at 1 AU // J. Geophys. Res. V. 87. P. 613–624. 1982.
- *Lanzerotti L.J.* Geomagnetic influences on man-made systems // J. Atmos. Terr. Phys. V. 41. P. 787–796. 1979.
- *Loewe C.A., Pröls G.W.* Classification and mean behaviour of magnetic storms // J. Geophys. Res. V. A102. P. 14209–14213. 1997.
- *Murayama T.* Origin of the semiannual variation of geomagnetic Kp indices // J. Geophys. Res. V. 79. P. 297–300. 1974.
- *Nevanlinna H.* New geomagnetic activity index series published for 1844–1880 // EOS. Trans. Am. Geophys. Union. V. 76. P. 233–234. 1995.
- *Lundstedt H., Gleisner H., Wintoft P.* Operational forecasts of the geomagnetic index Dst index // Geophys. Res. Lett. V. 29(24). P. 2181–2196. doi:10.1029/2002GL016151, 2002.
- *Pandey S.K., Dubey S.C.* Characteristic features of large geomagnetic storms observed during solar cycle 23 // Indian J. Radio and Space Phys. V. 38. P. 35–312. 2009.
- *Petrukovich A.A., Zakharov M.Y.* ap-index solar wind driving functions and its semiannual variations // Ann. Geophys. V. 25(7). P. 1465–1478. 2007.
- *Richardson I.G., Cliver E.W., Cane H.V.* Sources of geomagnetic storms for solar minimum and maximum conditions during 1972–2000 // Geophys. Res. Lett. V. 28. P. 2569–2584. 2001.
- *Russell C.T., McPherron R.L.* Semiannual variation of geomagnetic activity // J. Geophys. Res. V. 78. P. 92–108. 1973.
- *Schreiber H.* On the periodic variations of geomagnetic activity indices Ap and ap // Ann. Geophysicae. V. 16. P. 510–517. 1998.
- *Svalgaard L.* Geomagnetic activity: dependence on solar wind parameters // Zirker J.B. (Ed.), Coronal Holes and High Speed Wind Streams. V. 371. Colorado Associated University Press. Boulder. CO. 1977.
- *Svalgaard L., Cliver E.W., Ling A.G.* The semiannual variation of great geomagnetic storms // Geophys. Res. Lett. V. 29(16). P. 12. cite ID 1765, doi: 10.1029/2001GL014145. 2002.
- *Tsurutani B.T., Gonzales W.D., Lakhina G.S., Alex S.* The extreme magnetic storm of 1–2 September 1859 // J. Geophys. Res. V. 108, doi:10.1029/2002JA009504. 2003.
- *Tsyganenko N.A.* Effects of the solar wind conditions on global magnetospheric configuration as deduced from data-based field models // Eur. Space Agency Spec. Publ., ESA SP-389, P. 181–198. 1996.
- *Tsyganenko N.A.* A model of the near magnetosphere with a dawn-dusk asymmetry – 1. Mathematical structure // J. Geophys. Res. V. 107. № A8. 10.1029/2001JA000219. 2002a, and 2. – parametrization and fitting to observations // J. Geophys. Res. SMP10(1–17), 2002b.
- *Verma P.L., Gupta R.S., Chamadi P.K.* Large Geomagnetic Storms in Relation to CME Related Shocks and Magnetic Clouds // J. Plasma Fusion Res. SERIES. V. 8. P. 226–229. 2009.
- *Yermolaev Y.I., Yermolaev M.Y.* Comment on “Interplanetary origin of intense geomagnetic storms ( $Dst < -100$  nT) during solar cycle 23” by W. D. Gonzalez et al., // Geophys. Res. Lett. V. 35. L01101, doi:10.1029/2007GL030281. 2008.
- *Willis D.M., Stevens P.R., Crothers S.R.* Statistics of the largest geomagnetic storms per solar cycle (1844–1993) // Ann. Geophysicae. V. 15. P. 719–728. 1997.
- *Wilson R.W.* On the behaviour of the Dst of geomagnetic index in the vicinity of the magnetic cloud passage at Earth // J. Geophys. Res. V. 95. P. 215–219. 1990.
- *Wu C.-C., Lepping R.P.* Solar cycle effect on geomagnetic storms caused by interplanetary magnetic clouds // Ann. Geophys. V. 24. P. 3383–3389. 2006.