

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИГАНТСКИХ ВОЗМУЩЕНИЙ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

А.Е. Левитин<sup>1</sup>, Л.А. Дремухина<sup>1</sup>, Л.И. Громова<sup>1</sup>, Н.Г. Птицына<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН), Троицк, Московская обл., Россия

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский Филиал ИЗМИРАН, Санкт-Петербург, Россия

**Аннотация.** Представлен модельный расчет геомагнитной вариации, зарегистрированной в период исторической гигантской магнитной бури в сентябре 1858 г. в Индии, которая могла быть создана суммой магнитосферных токовых систем – токов на магнитопаузе, кольцевым током, токовой системой хвоста магнитосферы и высокоширотными магнитосферно-ионосферными токами. Расчет демонстрирует возможность генерации главной фазы этой бури, которая длится всего 2 часа и достигает амплитуды более 1500 нТл, а также быстрого восстановления поля как результат быстрого приближения к Земле границы плазменного слоя, и как результат быстрого и значительного смещения высокоширотных токов в сторону экватора. Для расчета используется параболическая модель магнитосферных токовых систем НИИЯФ МГУ и модель высокоширотных токовых систем ИЗМИРАН.

### Введение

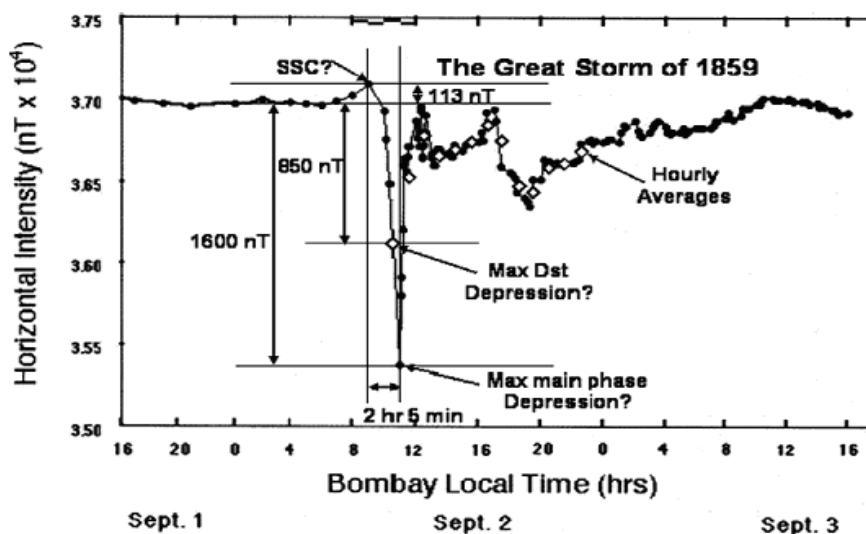
Гигантские магнитные бури – это бури, в периоды которых минимальное значение индекса *Dst* достигает амплитуды порядка -400 нТл и меньше. При этом форма *Dst*- вариации во время главных фаз таких бурь представляет собой очень быстрое, в течение 2-3 часов, изменение индекса *Dst* до его минимального значения и, последующее за этим, такое же быстрое его восстановление. Введенный, более полувека тому назад для количественного описания магнитных бурь, индекс *Dst* характеризует аксиально-симметричное возмущенное геомагнитное поле вблизи дипольного экватора на уровне земной поверхности. Отрицательная амплитуда его означает понижение геомагнитного поля, которое связывают с экваториальной токовой системой в магнитосфере, называемой кольцевым током. Обычно полагается, что токовая система в хвостовой части магнитосферы, дает малый вклад в понижение геомагнитного поля на уровне земной поверхности. Полагается также, что высокоширотная магнитосферно-ионосферная токовая система тоже вносит незначительный вклад в регистрируемое низкоширотными обсерваториями, по данным которых рассчитывается *Dst* индекс, геомагнитное возмущение. Однако, кольцевой ток, считающийся авторами *Dst* индекса основным генератором *Dst* вариации, физически не может так быстро возникать и распадаться, чтобы на его основе можно было объяснить временное поведение *Dst* вариации, которое фиксируется во время гигантских магнитных бурь. Мы уже обращали внимание на эту ситуацию и демонстрировали наш модельный расчет той части геомагнитной вариации в периоды исторической гигантской магнитной бури в сентябре 1859 г., которая могла быть создана именно токовой системой хвоста магнитосферы, в результате быстрого приближения к Земле границы плазменного слоя [Levitin, et al., 2009]. В данной работе мы приводим результат модельного расчета геомагнитной вариации в периоды исторической гигантской магнитной бури в сентябре 1859 г., которая могла быть создана совместным вкладом в эту вариацию двух токовых систем. А именно, токовой системой хвоста магнитосферы - в результате быстрого приближения к Земле границы плазменного слоя, и системой авроральных токов - в результате их быстрого смещения в сторону экватора. Для проведения такого расчета мы использовали параболическую модель магнитосферных токовых систем НИИЯФ МГУ и модель высокоширотных токовых систем ИЗМИРАН [Feldstein et al., 2005]. Выполненный модельный расчет подтверждает возможность объяснения генерации необычной формы *Dst* вариаций геомагнитного поля во время гигантских магнитных бурь за счет этих двух токовых систем.

### Расчет геомагнитного возмущения в период 2 сентября 1859 г.

В настоящее время отдельные исследователи полагают, что нас ожидает в период максимума текущего солнечного цикла гигантская солнечная вспышка и последующая за ней гигантская магнитная буря, что приведет к катастрофическим последствиям. Будет нарушена работа спутников и электросетей, трубопроводов и кабелей связи – урон может составить триллионы долларов. Прообразами таких явлений является магнитная буря 14 марта 1989 г., которая нарушила работу электросетей Канады и США, а также гигантская историческая магнитная буря в сентябре 1859 г. Если придерживаться следующей конкретной классификации характеристик мощности регистрируемых магнитных бурь: слабая буря – диапазон значительных амплитуд в буре (-30) – (-50) нТл; умеренная буря – (-50) – (-100) нТл; сильная буря – (-100) – (-200) нТл; очень сильная буря – (-200) – (-350) нТл; гигантская буря – (< -350) нТл, то соотношение между их появлением таково: первых бурь случается ~ 45%, вторых ~ 30%, третьих ~ 20%, четвертых ~ 5%, пятых

~ 1%. Это соответствует статистическому факту, что очень сильных магнитных бурь бывает в среднем по 1 буре в год, а гигантских – одна за 11-летний солнечный цикл. Так за период 1932-2002 гг. произошло 25 очень больших магнитных бурь, таких у которых пиковые амплитуды  $Dst$  индекса были в пределах (-300) - (-550) нТл. При этом 17 бурь произошли в периоды весеннего и осеннего равноденствия, 4 бури – зимой и 4 бури – летом. Такая сезонная закономерность появления мощных магнитных бурь, хорошо известна, но удовлетворительного объяснения ее причины до сих пор нет. Эта закономерность лежит в основе наличия сезонной вариации геомагнитной активности, максимумы этой активности, которая характеризуется среднемесячными значениями планетарного индекса  $Kp$ , чаще всего приходится на весеннее и осеннее равноденствие.

Указанная выше магнитная буря 14 марта 1989 г. имела пиковое значение индекса  $Dst = -548$  нТл. Историческая гигантская магнитная буря, о которой пойдет речь ниже, характеризуется магнитным возмущением в Колабе (Индия, широта  $19^{\circ}$ ) максимальная амплитуда которого - порядка (-1600) нТл. Гигантская магнитная буря 2-3 сентября 1859 г. получила широкую известность, благодаря сохранившейся магнитограмме обсерватории Колаба (Индия) (см. Рис.1).



**Рис. 1** Магнитограмма горизонтальной составляющей геомагнитного поля, зарегистрированной в Бомбее, Индия, в период магнитной бури 1-3 сентября 1859 г. [Tsurutani et al., 2003]

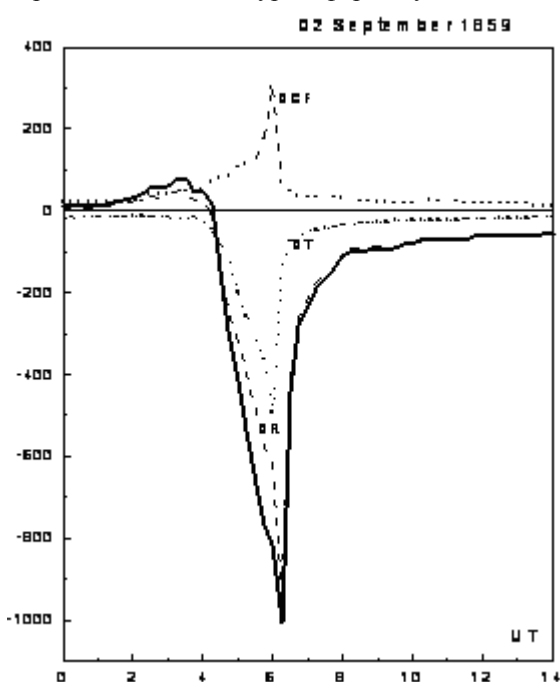
Авторы статей ([Tsurutani et al., 2003, Li et al., 2006, Siscoe et al., 2006] и ссылки в них) провели анализ зафиксированного временного изменения  $H$  компоненты вектора геомагнитного возмущения с целью оценки параметров межпланетной среды, ответственных за генерацию такой бури. По оценке отдельные исследователей,  $Dst$ -индекс 2 сентября мог достигать величины -1760 нТл. На основе конкретной современной модели генерации  $Dst$  вариации геомагнитного поля [Li et al., 2006], были сделаны, следующие оценки параметров солнечного ветра и межпланетного магнитного поля (ММП): скорость солнечного ветра  $V \approx 1500-1700$  км/с, концентрация протонов в нем  $N \approx 1200-1600$  см<sup>-3</sup>, вертикальная компонента вектора ММП  $B_z \approx (-40) - (-60)$  нТл. Анализ гигантских бурь, происходивших в периоды отсутствия данных о параметрах межпланетной среды, проводимый на основе современных моделей индексов геомагнитной активности и модели параметров магнитосферы, не может считаться корректным. Это связано с тем, что все эти модели были созданы на основе статистической обработки массивов данных, которые практически не содержали в себе такие большие амплитуды скорости и плотности солнечного ветра, а также компонент вектора ММП, как приведенные выше. Поэтому столь высокие амплитуды параметров межпланетной среды, полученные пересчетом, основанным на корреляционных современных моделях индексов  $Dst$ ,  $AE(AU)$ ,  $AL$  могут значительно отличаться от тех параметров, которые были в реальности.

При анализе магнитного возмущения, зафиксированного наблюдателями в Колабе, значительный интерес представляет не только амплитуда геомагнитного возмущения, но и физическая природа формы временного изменения  $H$  компоненты зафиксированного магнитного сигнала. Она не содержит обычно наблюдаемого при магнитных бурях характерного временного хода восстановления поля, связанного с распадом частиц кольцевого тока. В этой буре скорости изменения поля в период главной фазы и в период фазы восстановления практически одинаковы. Исследователями было давно отмечено, что когда начинается фаза восстановления больших магнитных бурь, то в самом ее начале восстановление магнитного поля идет значительно быстрее, чем спустя 2-4 часа. Этому эффекту в литературе существует

несколько объяснений. Первое и достаточно справедливое объяснение состоит в том, что во время развития таких бурь кольцевой ток включает в себя ионы кислорода, вытянутые электрическим полем из ионосферы. При этом их концентрация весьма значительная - на уровне или больше концентрации протонов. Однако их время жизни составляет всего 3-5 часов, по сравнению с 15-20 часами жизни протонов. Второе теоретическое объяснение такого эффекта, основано на одной из современных моделей развития магнитной бури, которая была разработана группой американских ученых. Эта модель построена на данных американских стационарных спутников (высота орбит - 6.6 радиусов Земли). Измерения распределения по пространству заряженных частиц, двигающихся из хвоста магнитосферы в сторону Земли, на этих аппаратах используются для задания начальных условий расчета этого их движения.

Далее, по соответствующим моделям распределения электрического и магнитного полей, проводился расчет движения этих частиц, и рассчитывалось магнитное возмущение, создаваемое кольцевым током, носителями которых данные частицы являются. Из такого расчета получалось, что в период развития кольцевого тока он был не замкнутым, а когда концентрация и энергия частиц, поступающих из хвостовой части магнитосферы, падали, то он становился замкнутым, что сразу резко меняло интенсивность создаваемого им магнитного поля. Третье объяснение вытекает из предположения о том, что в период значительных магнитных бурь плазменный слой магнитосферы может резко приближаться к земле в период поступления энергии из солнечного ветра и также резко возвращаться назад. При этом создается сначала резкое усиление магнитного возмущения на уровне земной поверхности, так как токовая система хвостовой части магнитосферы генерирует поле, совпадающее по знаку с полем кольцевого тока, а потом резкое его убывание. Именно такой сценарий генерации буревого магнитного возмущения и его убывания был нами использован при моделировании рассматриваемой исторической магнитной бури [Levitin et al., 2009].

Но есть и четвертое, лежащее на поверхности, объяснение наблюдаемого эффекта. Это влияние высокоширотной токовой системы на магнитное возмущение в средних и низких широтах. Здесь важно только обосновать возможность возникающего магнитного возмущения в зоне полярных сияний, когда там они в периоды магнитных бурь регистрируются с амплитудой до 2500 нТл (данные *AE*, *AU*, *AL* индексов), смещаться к экватору на значительные расстояния. Мы обосновываем наличие такой ситуации в период сверх гигантской магнитной бури фактом смещения реально наблюдаемых сияний в период ее развития почти до экватора. Необычная временная динамика геомагнитного возмущения на низкоширотной обсерватории анализировалась различными группами исследователей, и отдельные авторы объясняют ее наличием очень большой амплитуды динамического давления солнечного ветра в период бури. В своем оценочном расчете магнитного возмущения, зарегистрированного в Колабе, они используют модель, созданную на основе статистического подбора параметров, что позволяет описывать *Dst* вариацию в периоды магнитных бурь в форме суммы полей от отдельных токовых источников.

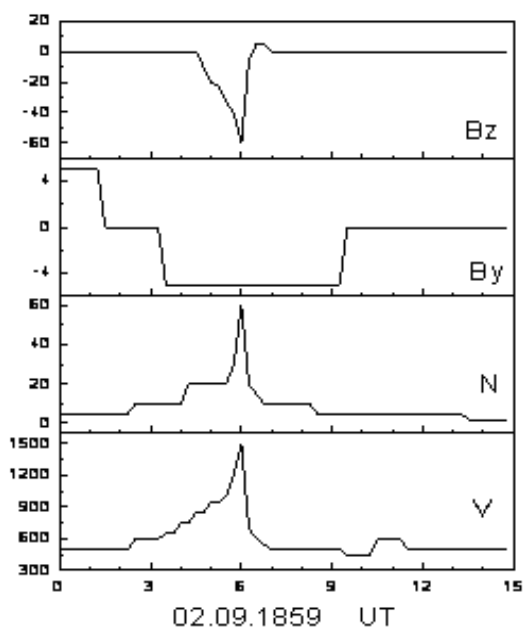


**Рис. 2** Модельный расчет магнитного возмущения, создаваемого токовыми системами: кольцевой ток *DR*, хвостовой ток *DT*, ток на поверхности магнитосферы *DCF* (прерывистые линии) и их сумма (жирная линия).

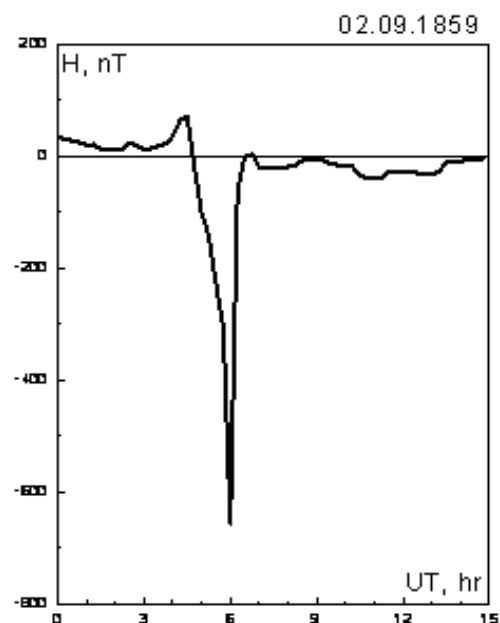
Этими источниками они чаще всего считают ток на поверхности магнитосферы, кольцевой ток, частичный кольцевой ток и ток в хвостовой части магнитосферы. Но при этом они полагают, что токовая система хвоста не является одной из главных магнитосферных токовых систем, участвующих в генерации наблюдаемого магнитного возмущения. Мы же при моделировании опираемся на полученный нами при анализе магнитосферных токовых систем вывод, который говорит о следующем. В периоды больших бурь магнитосферная хвостовая токовая система создает магнитное возмущение в низких широтах по амплитуде не уступающее, а иногда даже превосходящее, магнитное возмущение, создаваемое кольцевым током, за счет значительного смещения плазменного слоя к Земле [Feldstein et al., 2005].

Именно такое смещение может объяснить конфигурацию геомагнитного сигнала на обсерватории Колаба, показанного на Рис. 1. Представленная на рисунке магнитограмма отличается от обычных магнитограмм магнитных бурь тем, что в данном случае главная фаза бури длится всего 2 часа, в течение которых поле меняется на 1600 нТл. При этом и начальная часть фазы восстановления происходит очень быстро - поле восстанавливается от 1600 нТл до порядка 400 нТл всего за полтора часа. На Рис. 2 представлен наш модельный расчет магнитного

возмущения, создаваемого токовыми системами:  $DR$  (кольцевой ток),  $DT$  (хвостовой ток),  $DCF$  (ток на поверхности магнитосферы) и их сумма (жирная линия). На Рис. 3 представлены компоненты вектора ММП и параметры солнечного ветра, используемые для нашего модельного расчета магнитного возмущения во время магнитной бури 2 сентября 1859 г. Сверху – вниз приводятся: временная динамика (часы)  $B_z$  и  $B_y$  компонент вектора ММП (нТл); концентрация  $N$  ( $\text{см}^{-3}$ ) и скорость плазмы солнечного ветра (км/с). Эти параметры соответствуют параметрам, которые используются в расчетах этой бури большинством исследователей. На Рис. 4 представлен наш модельный расчет магнитного возмущения в период анализируемой магнитной бури - суммарное магнитное поле от всех токовых систем: тока  $DR$ , тока  $DT$ , тока  $DCF$  и высокоширотного тока, смещенного до широты  $40^\circ$ .



**Рис. 3** Компоненты вектора ММП и параметры солнечного ветра, используемые для модельного расчета магнитного возмущения во время магнитной бури 2 сентября 1859 г.



**Рис. 4** Модельный расчет магнитного возмущения в период магнитной бури: суммарное магнитное поле от всех токовых систем:  $DR$  (кольцевой ток) +  $DT$  (хвостовой ток) +  $DCF$  (ток на поверхности магнитосферы) +  $DP$  (высокоширотный ток, который был смещен до широты  $40^\circ$ ).

## Выводы

Представлен модельный расчет геомагнитной вариации, зарегистрированной в период исторической гигантской магнитной бури в сентябре 1858 года в Индии. Расчет демонстрирует возможность генерации главной фазы этой бури, которая длится всего 2 часа и достигает амплитуды более 1500 нТл, а также скорое по времени восстановление поля как результат быстрого приближения к Земле границы плазменного слоя, и как результат быстрого и значительного смещения высокоширотных токов в сторону экватора. Считаем, что модельный расчет магнитного возмущения во время гигантских магнитных бурь должен включать в себя магнитные поля, создаваемые следующими токовыми системами: токовой системой на поверхности магнитосферы ( $DCF$ ); токовой системой кольцевого тока ( $DR$ ); токовой системой в хвосте магнитосферы ( $DT$ ); высокоширотной токовой системой ( $DP$ ).

Авторы поддерживаются РФФИ, грант 11-05-00306.

## Список литературы

1. Feldstein, Y. I., Levitin, A. E., Kozyra, et al., Self-consistent modeling of the large-scale distortions in the geomagnetic field during the 24–27 September 1998 major magnetic storm, *J. Geophys. Res.*, 110, (A11), 214, doi: 10.1029/2004JA010584, 2005
2. Levitin A.E., L.A. Dremukhina, L.I. Gromova, N.G. Ptitsyna, Model of magnetic disturbances during the historic extreme magnetic storm of 1-2 September 1859, “*Physics of Auroral Phenomena*”, *Proc. XXXII Annual Seminar*, 37-40, 2009
3. Li, X., Tsurutani B.T., Temerin V., et al., Modeling the 1–2 September 1859 super magnetic storm, *Adv. Space Res.*, 38, 273–279, 2006
4. Siscoe G., Crooker N.U., Clauer C.R. *Dst* of the Carrington storm of 1859, *Adv. Space Res.*, V. 38, P. 173, 2006
5. Tsurutani, B.T., Gonzalez, W.D., Lakhina, G.S., Alex, S., J. The extreme magnetic storm of 1–2 September 1859 *J. Geophys. Res.* V. ,1268, doi:10.1029/2002JA009504, 2003.