

## АНАЛИЗ ДАННЫХ МАГНИТНОЙ ОБСЕРВАТОРИИ «МОСКВА» В ПЕРИОД СПОКОЙНОГО СОСТОЯНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УРОВНЯ ОТСЧЕТА ГЕОМАГНИТНЫХ ВАРИАЦИЙ

А.Д. Шевнин, Л.А. Дремухина, А. Е. Левитин, Л.И. Громова, С.В. Громов

*Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН  
(ИЗМИРАН), Троицк, Московская обл., Россия*

**Аннотация.** За период низкой солнечной и геомагнитной активности (2006-2009 гг.) по данным обсерватории «Москва» исследованы суточные вариации магнитного поля Земли, регистрируемые в периоды очень спокойного состояния магнитосферных и ионосферных токовых систем. На основе такого исследования может быть выделен уровень отсчета геомагнитных вариаций для оценки временной динамики локальной геомагнитной активности на обсерватории в течение 60 лет ее работы.

### Введение

Для выделения геомагнитных вариаций по данным обсерваторских геомагнитных измерений необходимо ввести конкретный уровень отсчета магнитного поля для количественной оценки выделяемых вариаций, создаваемых магнитосферными и ионосферными токовыми источниками. Так как геомагнитное поле, регистрируемое в обсерватории, является суммой полей от внутренних и внешних токовых систем, то определение такого уровня является неоднозначной задачей, результат решения которой определяется принятыми постулатами, обеспечивающими физическое обоснование применяемому методу решения подобной задачи. Естественно, что первым шагом при поиске такого уровня отсчета является выбор дней, когда геомагнитная активность была минимальной (магнитно-спокойные дни) в определенном сезоне года; он делается на основе индексов геомагнитной активности. Одним из следующих шагов является проведение количественной оценки вековой вариации магнитного поля Земли на данной обсерватории. Далее, на основе конкретных предположений о связи магнитосферных и ионосферных токовых систем с параметрами солнечного ветра и солнечной активности, необходимо провести выбор конкретных временных интервалов в отобранных спокойных днях, то есть, определить конкретные часы суток, когда вклад этих систем в измеряемое магнитное поле будет возможно оценить на количественном уровне.

Первое рассмотрение задачи определения временных периодов спокойного состояния геомагнитного поля, когда можно выделить так называемый нулевой уровень магнитного поля Земли для количественного расчета амплитуд геомагнитных вариаций, относится к началу прошлого века. Ниже представленный анализ выполнен на данных обсерватории «Москва» за период низкой солнечной и геомагнитной активности в конце 23 солнечного цикла. Представлены выделенные уровни отсчетов  $H$ ,  $D$ ,  $Z$  компонент вектора магнитного поля Земли на обсерватории «Москва» при очень спокойном состоянии геомагнитного поля.

### Анализ геомагнитных данных обсерватории «Москва» за период низкой солнечной и геомагнитной активности в 2006-2009 гг.

Для исследования двух крайних состояний геомагнитного поля (спокойное, возмущенное) международным сообществом магнитологов, почти век тому назад, было принято соглашение о выделении на основе конкретной количественной оценки в каждом месяце года пяти магнитно-спокойных и пяти магнитно-возмущенных дней [Chapman and Bartels, 1940]. При этом полагалось, что состояние геомагнитного поля в магнитно-спокойные дни определяется суммой четырех его составляющих: главного магнитного поля Земли ( $M$ ), его вековой вариации ( $m$ ), солнечно-суточной вариации ( $Sq$ ) и нециклической вариацией ( $N$ ). Эта последняя вариация создается теми генераторами поля, которые создают возмущенное геомагнитное поле в магнитно-возмущенные дни [Фаткулин и Фельдштейн, 1965], и общая суммарная напряженность поля в магнитно-спокойный день  $B = M + m + Sq + N$ . Составляющие  $M$  и  $m$  принято определять по среднегодовым амплитудам  $H$ ,  $D$ ,  $Z$  компонент вектора магнитного поля Земли на обсерватории. При этом подразумевается, что вариации переменной части этого поля, которые могут иметь то положительные, то отрицательные амплитуды, складываясь за год, составляют практически нулевую алгебраическую сумму [Яновский, 1953]. Такой постулат не всегда выполняется, так как количество магнитных бурь в году и возникновение кратковременных геомагнитных возмущений, связанных с появлением повышенных амплитуд параметров межпланетной среды (скорость, плотность солнечного ветра, знак и амплитуда компонент вектора межпланетного магнитного поля) – величина случайная. Она зависит от солнечной активности внутри её 11-летнего цикла, что приводит к различному вкладу в среднегодовые амплитуды геомагнитного поля разных лет магнитных полей, создаваемых магнитосферными и ионосферными токовыми системами [Шевнин и др.,

2009]. Поэтому для более точного выделения величин  $M$  и  $m$  необходимо использовать не среднегодовые геомагнитные данные, как это принято делать в обсерваториях, а статистику геомагнитных данных для очень геомагнитно-спокойных дней года. В такие спокойные периоды состояния магнитного поля планеты обсерваторские приборы фиксируют магнитные поля, создаваемые токовой системой спокойного кольцевого тока  $DR$ , током на магнитопаузе  $DCF$ , трехмерными токами в высоких широтах, токовой системой в хвосте магнитосферы и динамо током в ионосфере ( $Sq$ -вариацию). Амплитуду магнитного поля спокойного кольцевого тока на уровне земной поверхности на широте экватора однозначно определить трудно; полагают, что она отрицательная порядка  $-(10 - 20)$  нТл. Амплитуда поля токовой системы  $DCF$  пропорциональна амплитуде кинетического давления плазмы солнечного ветра вблизи границы магнитосферы и при средних амплитудах скорости ветра  $\sim 400$  км/с и плотности плазмы  $\sim 7$  см<sup>-3</sup>, она положительная порядка  $+(10 - 15)$  нТл. Амплитуда  $Sq$ - вариации зависит от широты и изменяется ото дня ко дню даже в течение магнитно-спокойных периодов времени, так как проводимость ионосферы зависит от солнечного волнового излучения [Акасофу и Чепмен, 1975]. Чепмен при анализе геомагнитных данных 21 обсерватории за 1902 и 1905 гг. принимал за уровень отсчета солнечно-суточной  $Sq$ -вариации среднее значение магнитного поля за сутки [Chapman and Bartels, 1940]. Современные исследователи принимают за такой уровень усредненные значения поля в конкретные ночные часы суток [Фаткулин и Фельдштейн, 1965]. Устранение нециклической вариации  $N$  провести сложно, так как модели магнитосферных токовых систем еще недостаточно совершенны, чтобы, опираясь на них, можно было бы её убрать. Поэтому сохранился подход к описанию геомагнитного поля  $B$  спокойного дня с привлечением солнечно-суточной геомагнитной вариации  $Sq$ , который опирается на следующую классификацию источников поля:  $B = (M + m) + Sq(B) + (DCF + DR)$ , которая включает в себя в качестве причины вариации  $N$  поле токов на магнитопаузе и поле кольцевого тока. Суточные вариации  $B$  за пять спокойных дней месяца используются как уровень отсчета поля для расчета трехчасового геомагнитного  $K$ -индекса, который характеризует локальную геомагнитную активность на конкретной обсерватории.  $K$ -индекс - это квазилогарифмический индекс (увеличивается на единицу при увеличении возмущенности приблизительно в два раза), вычисляемый по данным конкретной обсерватории за трехчасовой интервал времени. Индекс был введен Дж. Бартельсом в 1938 г. и представляет собой значения от 0 до 9 для каждого трехчасового интервала (0 - 3, 3 - 6, 6 - 9 и т.д.) мирового времени. Для вычисления индекса берется изменение магнитного поля за трехчасовой интервал, из него вычитается регулярная часть, определяемая по спокойным дням, и полученная величина по специальной таблице переводится в  $K$ -индекс. Поскольку магнитные возмущения проявляются по разному в различных местах на земном шаре, то для каждой обсерватории существует своя таблица расчета этого индекса, построенная так, чтобы различные обсерватории в среднем за большой интервал времени давали одинаковые индексы. Для обсерватории «Москва» соответствие магнитных возмущений и значений  $K$ -индекса приведено в Таблице 1.

**Таблица 1.** Таблица расчета  $K$ -индекса для обсерватории «Москва»

Вариация, нТл	< 5	5 - 10	10 - 20	20 - 40	40 - 70	70 - 120	120 - 200	200 - 330	330 - 550	> 550
<b><math>K</math>-индекс</b>	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9

Выбранные нами для анализа данных четыре очень спокойных года характеризуются малым числом магнитных бурь и низкими уровнями их интенсивности по сравнению с любым предыдущим годом. В Таблице 2 для этих лет приводится число магнитных бурь, зафиксированных обсерваторией «Москва», с

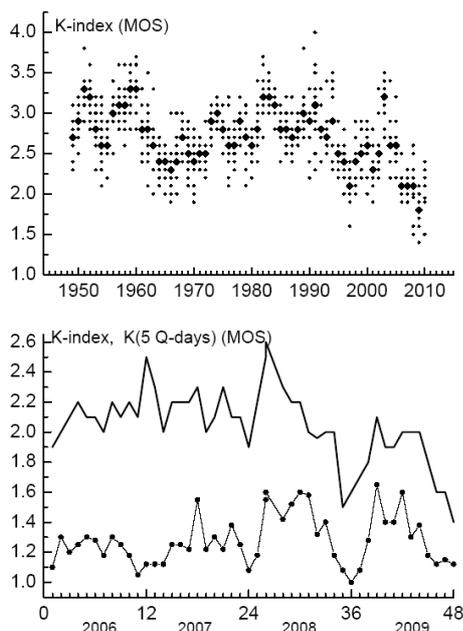
**Таблица 2.** Количество магнитных бурь разной интенсивности, зафиксированных на обсерватории «Москва»

Год	М-буря	У-буря	Б-буря	ОБ-буря
2006	32	7	1	1
2007	32	4	0	0
2008	25	2	0	0
2009	7	0	0	0

указанием их интенсивности: М - малая, У - умеренная, Б - большая, ОБ - очень большая.

На Рис. 1 вверху приведены среднемесячные и среднегодовые значения  $K$ -индекса за период 1949-2010 г.г.; значения индекса отложены на оси ординат так, что на рисунке можно увидеть и изменения индекса в каждом году и его циклические изменения за весь период. В нижней части рисунка приведены среднемесячные значения  $K$ -индекса, рассчитанные по данным за 2006-2009 гг. по всем дням, и по пяти спокойным дням каждого месяца. Видно, что геомагнитная активность в рассматриваемые четыре года чрезвычайно низкая.

Обсерваторские измерения представляются в форме таблиц среднечасовых значений указанных выше трех компонент вектора магнитного поля Земли (эти данные мы обозначим буквой  $A$ ), таблиц данных по двум группам дней – по пяти международным магнитно-спокойным дням ( $Q$ -дни,  $Q$ -данные) и пяти международным магнитно-возмущенным дням ( $D$ -дни,  $D$ -данные). Для характеристики возмущенности в конкретный день используются среднесуточное значение компонент вектора поля, а для уровня отсчета амплитуд геомагнитного возмущения в каждый час суток используют или среднесуточное значение поля,



**Рис. 1.** Вверху: среднемесячные (точки вдоль вертикали каждого года) и среднегодовые (ромбы) значения  $K$ -индекса за период 1949-2010 гг.; внизу: среднемесячные значения  $K$ -индекса (верхняя сплошная кривая) и средние значения  $K$ -индекса для 5-ти спокойных дней месяца (нижняя кривая с кружками) за 2006-2009 гг.

получаем амплитуду геомагнитного возмущения, создаваемого внешними источниками поля в любой день года. Так как существует вековой ход главного магнитного поля Земли, то его надо учитывать, внося поправку на этот ход в зависимости от разности лет между исследуемым конкретным годом и 2006 годом. Обычно расчет локальной скорости изменения главного магнитного поля планеты проводится на основе разности среднегодовых амплитуд компонент вектора поля, зарегистрированной приборами обсерватории. На самом деле среднегодовое значение компонент вектора поля содержит в себе не только поле, генерированное током, расположенном в глубине планеты (то есть, постоянным магнитным полем Земли), но и поле, создаваемое внешними источниками. Поэтому разность среднегодовых амплитуд поля зависит от того, какая геомагнитная активность была в годы, между которыми определяется эта разность. Наличие четырех магнитно-спокойных лет позволяет нам более точно, чем в предыдущие годы, получить оценку скорости векового хода, используя которую, мы можем исследовать на количественном уровне геомагнитную активность в период всех лет работы обсерватории «Москва». На Рис. 3 приведены среднемесячные значения составляющих вектора магнитного поля, полученные на основе анализа суточных данных (жирная сплошная линия), а также на основе ночных данных  $H_q$  за UT =20-22 (линия с точками).

Мы полагаем, что нулевой уровень геомагнитной активности может быть получен как значения поля лежащие на линии, проведенной для  $H$  компоненты (сплошная тонкая линия) через минимальные значения  $H_q$ . Для начала 2006 года это минимальное значение равно 17167 нТл, а скорость изменения векового хода составляет 4.25 нТл/год. Мы полагаем, что геомагнитную активность лучше всего контролировать через

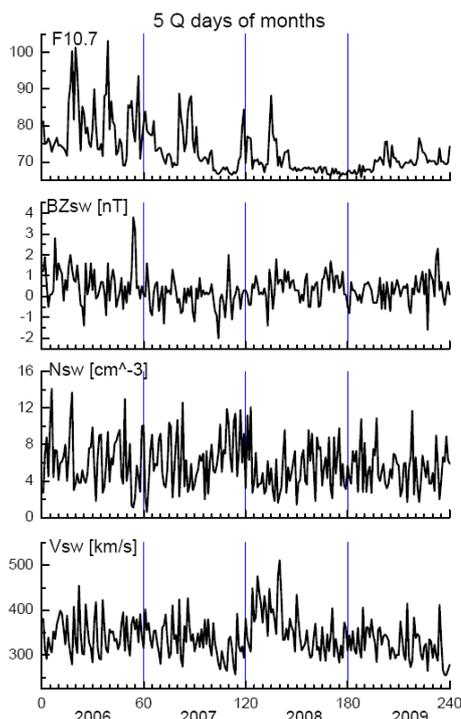
или амплитуды поля в ночные часы суток; мы используем для этой цели, как указано выше, интервал 20 - 22 часов мирового времени.

Для групп геомагнитных данных ( $A, Q$ ) были составлены разности  $A - Q$  и  $D - Q$  для ночных и средних значений трех компонент  $H, D, Z$  вектора поля каждого месяца исследуемых четырех магнитно-спокойных лет. В Таблице 3 приведены рассчитанные за 4 года среднемесячные значения (и их среднее) разностей между  $A$ -днями и  $Q$ -днями всех трех составляющих вектора геомагнитного поля. При этом, столбцы  $n$  относятся к разностям, рассчитанным по среднесуточным значениям геомагнитных составляющих, а столбцы  $m$  относятся к рассчитанным по ночным часам. Из этой таблицы следует, что разности  $H(A)-H(Q)$  не превышают 4 нТл, разности  $Z(A)-Z(Q)$  – 1,5 нТл, а разности  $D(A)-D(Q)$  – 1,2 угловых минут. Поэтому далее мы используем данные 5 спокойных дней.

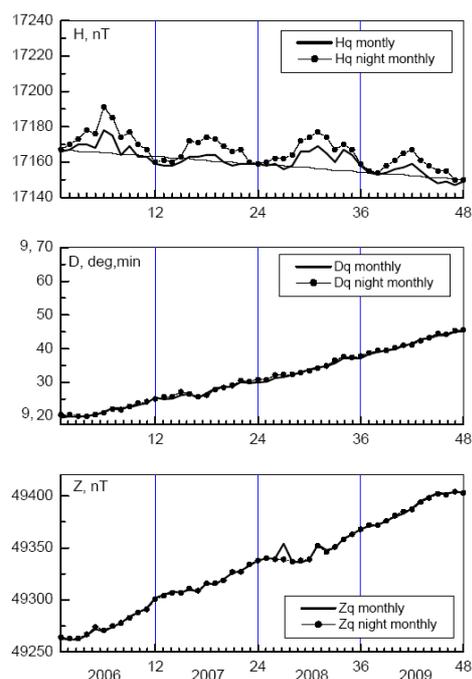
На Рис. 2 для информации об интенсивности солнечной активности и параметров солнечного ветра в рассматриваемом временном периоде 4 лет приводятся следующие данные: значение индекса потока солнечного радиоизлучения F10.7;  $Bz$ -компонента вектора межпланетного магнитного поля; плотность  $N$  и скорость  $V$  солнечного ветра. Видно, что все эти параметры свидетельствуют о низком уровне космической погоды, что и делает эти годы годами очень низкой геомагнитной активности. Соответственно, выбрав массив данных, относящихся к  $Q$ -дням, мы по ним определяем уровень отсчета (нулевой уровень) геомагнитной активности. Этот уровень представляет собой амплитуды для каждого дня конкретного месяца года, до начала 2006 года и после него, вычитая которые из данных обсерваторских измерений,

**Таблица 3.** Среднемесячные значения разностей между  $A$ -днями и  $Q$ -днями и их среднее для  $H, Z$  и  $D$  составляющих вектора геомагнитного поля, рассчитанные за 2006 -2009 гг.

Месяцы	H(A) - H(Q)		Z(A) - Z(Q)		D(A) - D(Q)	
	n	m	n	m	n	m
I	-3.5	-4.2	0.8	1.8	1.2	0.5
II	-4.0	-4.0	1.0	1.0	1.2	0.4
III	-1.8	-3.5	0.5	0.7	1.1	0.4
IV	-3.0	-4.2	0.0	1.8	1.2	0.5
V	-1.0	-1.2	0.0	1.5	1.2	0.3
VI	-1.5	-0.5	1.0	1.8	0.7	0.3
VII	-1.2	-1.5	1.5	1.5	0.4	0.2
VIII	-1.8	-2.0	0.5	0.2	0.8	0.3
IX	-0.5	-2.0	0.0	0.8	0.6	0.2
X	-3.5	-3.5	-0.2	0.2	1.5	0.5
XI	-3.0	-3.8	0.8	1.5	1.4	0.4
XII	-3.8	-5.0	0.2	1.5	1.1	0.0
Среднее	-2.4	-3.0	0.5	1.2	1.0	0.3



**Рис. 2.** Среднесуточные значения индекса потока солнечного радиозлучения F10.7 и параметры солнечного ветра (вертикальная составляющая ММП, плотность и скорость) для пяти спокойных дней месяцев периода 2006-2009 гг.



**Рис. 3.** Среднемесячные (сплошная линия) и среднемесячные ночные (линия с кружками) значения  $H$ -,  $D$ -,  $Z$  – составляющих геомагнитного поля, рассчитанные по 5-ти спокойным дням месяца, на обс. «Москва» в 2006-2009 гг.

временную динамику именно  $H$  компоненты, так как она более двух других компонент вектора поля отражает интенсивность магнитосферных токовых систем.

### Заключение

Проведен анализ данных магнитной обсерватории «Москва» за период низкой солнечной и геомагнитной активности в конце 23 солнечного цикла. Представлен метод выделения уровня отсчета  $H$ ,  $D$ ,  $Z$  компонент вектора магнитного поля Земли на обсерватории «Москва» в период очень спокойного состояния геомагнитного поля. На основе такого уровня и выделения скорости векового хода главного магнитного поля Земли на обсерватории появляется возможность проводить количественные расчеты амплитуд геомагнитных вариаций за весь полувековой период ее работы, т.е. количественную оценку уровня геомагнитной возмущенности за эти годы и классификацию геомагнитной активности по часам, дням и месяцам этих лет. Распространение такого метода оценки локальной геомагнитной возмущенности для обсерваторий мировой сети позволит получить карты распределения геомагнитной активности по поверхности Земли в прошлом и в реальном масштабе времени. Такое количественное описание геомагнитной активности позволит провести её классификацию и выявить реальную интенсивность геомагнитных бурь, которая сегодня определяется только по минимуму  $Dst$  индекса в период бури, и позволит более точно контролировать геомагнитную возмущенность в полярных шапках и авроральных зонах по сравнению с контролем на основе индексов геомагнитной активности  $PC$ ,  $AE(AU, AL)$ . Авторы поддерживаются РФФИ, грант 11-05-00306.

### Список литературы

1. Акасофу С. И., Чепмен С. Солнечно-земная физика. - М.: Мир. 1975.
2. Фаткуллин М.Н., Фельдштейн Я.И. Спокойные солнечно-суточные вариации геомагнитного поля в период МГГ. Нециклические вариации в магнитоспокойные дни. Сезонные изменения значений поля в ночные часы // Геомагнетизм и аэрономия. Т.5, № 4. С. 735–739. 1965.
3. Шевнин В.Д., А.Е.Левитин, Л.И. Громова, Л.А. Дремухина, Л.Н. Кайнара. Солнечная циклическая вариация в магнитных элементах обсерватории Москва // Геомагнетизм и аэрономия, Т.49, №3, С.315-320. 2009.
4. Яновский Б.М. Земной магнетизм. -Л.: ЛГУ. 1964.
5. Chapman S., Bartels J. Geomagnetism. -Oxford University Press. 1940.