

На правах рукописи

Вохмянин Михаил Владимирович

**МАГНИТНОЕ ПОЛЕ СОЛНЦА ПО
ГЕОМАГНИТНЫМ ДАННЫМ**

Специальность 01.03.03 — физика Солнца

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург — 2014

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный университет»

Научный руководитель: **Понявин Дмитрий Иванович**,
кандидат физико-математических наук, доцент

Официальные оппоненты: **Дергачев Валентин Андреевич**,
доктор физико-математических наук, профессор,
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН»

Тясто Марта Ильинична,
доктор физико-математических наук,
Санкт-Петербургский филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В.Пушкова РАН»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение «Арктический и антарктический научно-исследовательский институт»

Защита состоится 17 декабря 2014 г. в ___ часов на заседании диссертационного совета 212.232.35 по защите докторских и кандидатских диссертаций при Санкт-Петербургском государственном университете по адресу:

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке им. М. Горького Санкт-Петербургского государственного университета по адресу: 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7/9 и на сайте <http://spbu.ru/science/disser/dissertatsii-dopushchennye-k-zashchite-i-svedeniya-o-zashchite>.

Автореферат разослан “___” _____ 20__ г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 212.232.35, к.ф.-м.н.

Кубышкина Марина Валерьевна

Общая характеристика работы

Актуальность темы.

С появлением спутников и космических аппаратов в начале 1960-х годов произошел значительный прорыв в понимании физических процессов, происходящих в околоземном космическом пространстве. В частности был обнаружен предсказанный Юджином Паркером солнечный ветер — поток заряженных частиц, исходящий из верхних слоев солнечной атмосферы, который, перенося солнечное магнитное поле, формирует межпланетное магнитное поле (ММП). Полярность ММП — направление вдоль силовых линий к Солнцу (отрицательная полярность) или от него (положительная), определяется крупномасштабным магнитным полем Солнца. В плоскости эклиптики образуется секторная структура ММП — чередование ММП противоположной полярности. Свальгард и Мансуров обнаружили, что в зависимости от полярности сектора на высокоширотных магнитных станциях наблюдаются разные типы вариаций геомагнитного поля. Анализируя соответствующие вариации, можно определить полярность ММП даже в то время, когда измерения ММП были недоступны, то есть в доспутниковый период. На сегодняшний день в нашем распоряжении имеются регулярные спутниковые измерения ММП, начиная примерно с 1965-го года, что по времени составляет порядка пяти циклов солнечной активности или чуть больше двух магнитных циклов Хэйла. Восстановление полярности ММП в доспутниковый период позволяет получить сведения о свойствах и эволюции секторной структуры ММП за гораздо более длительный интервал времени, что обеспечивает актуальность темы, исследуемой в диссертации.

Степень разработанности темы.

Первые методы восстановления полярности ММП были разработаны Свальгардом [1] и Мансуровым [2] в 1972-м и 1973-м годах соответственно. В методе Мансурова использовались данные одной южной станции — Восток, и двух северных — Туле и Резолут Бэй. Обязательное условие одновременной доступности всех указанных станций ограничивало возможность восстановления полярности ММП в прошлом 1957-м годом, когда появились первые измерения геомагнитного поля на станции Восток. Соответственно, этот метод давал сведения о секторной структуре лишь за девять лет доспутникового периода.

Свальгарду удалось восстановить полярность ММП вплоть до 1926-го года. Для этого использовались геомагнитные данные H компоненты субавро-ральной станции Годхавн, открытой в начале 20-го века. Несмотря на достаточно высокую точность результатов — порядка 80% совпадений со спутниковыми данными, метод подвергся критике Рассэллом и Розенбергом [3]. Согласно их

замечаниям дни повышенной геомагнитной активности преимущественно классифицировались как дни отрицательной полярности, и наоборот, спокойные дни чаще классифицировались как дни положительной полярности.

Веннерстрём с соавторами разработали метод [4], опубликованный в 2001-м году, который позволил на основе геомагнитных данных субавроральной станции Ситка восстановить полярность вплоть до 1905-го года. Однако, результаты этого метода отсутствуют в открытом доступе.

Целью данной работы является реконструкция и исследование межпланетного магнитного поля за длительный период времени, когда спутниковые измерения были недоступны.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

1. Разработать метод, позволяющий по вариациям геомагнитного поля с высокой точностью восстанавливать секторную структуру межпланетного магнитного поля;
2. Оценить точность метода, сравнив результаты со спутниковыми данными, и проверить их достоверность в допутниковый период;
3. Исследовать свойства реконструированной секторной структуры межпланетного магнитного поля в прошлом;

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Оцифрованы и приведены к современному стандарту измерения геомагнитного поля в Санкт-Петербурге в 19-м веке, а также скорректированы геомагнитные данные Хельсинки и Екатеринбурга;
2. Разработан новый метод, позволяющий с высокой точностью восстанавливать полярность межпланетного магнитного поля даже по данным среднеширотных станций, в результате удалось восстановить секторную структуру ММП вплоть до 1844-го года;
3. Показано на большом статистическом материале отсутствие у секторной структуры ММП устойчивых периодов вращения; чаще всего наблюдается 27-дневная периодичность ММП и двухсекторная структура; периоды вращения порядка 28–29 дней наиболее характерны для фазы роста и максимума солнечной активности; четырёхсекторная структура ММП имеет период ~ 27 дней и наблюдается гораздо реже, в основном на фазе спада и минимума активности;
4. Показано, что начиная с 9-го цикла солнечной активности, переполусовка магнитного поля Солнца действительно происходила с известным периодом магнитного цикла Хэйла порядка 22 лет;

5. Продемонстрировано, что большинство самых сильных за всю историю наблюдений геомагнитных бурь совпадает с периодом смены полярности секторов ММП, причём для бурь вблизи весеннего равноденствия чаще наблюдается смена полярности ММП с положительной на отрицательную, а для бурь в осенние месяцы — наоборот.

Научная новизна:

1. Впервые показано, что полярность межпланетного магнитного поля можно восстанавливать, анализируя вариации геомагнитного поля на среднеширотных станциях;
2. Впервые реконструирована секторная структура межпланетного магнитного поля вплоть до 1844-го года;
3. Впервые показано, что, по крайней мере с 9-го цикла солнечной активности, переполюсовка магнитного поля Солнца действительно происходила;
4. Впервые показано, что даты большинства сильнейших геомагнитных бурь приходятся на периоды смены полярности сектора межпланетного магнитного поля.

Практическая значимость диссертационной работы заключается в том, что полученный каталог полярностей ММП даёт сведения о магнитном поле Солнца в периоды, когда отсутствовали не только спутниковые измерения, но даже не было представлений о наличии у Солнца магнитного поля. Таким образом, восстановленная за 1844–1964 гг. секторная структура ММП является значительным дополнением к уже имеющимся данным магнитного поля Солнца и может быть использована в широком спектре задач исследования физики Солнца.

Достоверность результатов восстановления полярности ММП оценивалась сравнением с данными спутниковых измерений. Проверка показала высокую точность результатов метода для любого периода года и даже при использовании геомагнитных данных среднеширотных станций. В работе продемонстрировано, что ни низкий, ни высокий уровни геомагнитной активности не приводят к избыточному определению той или иной полярности ММП. Результаты, полученные с использованием геомагнитных данных различных станций, хорошо согласуются между собой, что подтверждает высокую степень их достоверности.

Апробация работы. Результаты, представленные в диссертации докладывались на российских и международных конференциях:

1. «Солнечная и солнечно-земная физика» (Санкт-Петербург) в 2010, 2012 и 2013 гг.;
2. «Problems of geocosmos» (Санкт-Петербург) в 2010 и 2012 гг.;
3. «Physics of auroral phenomena» (Апатиты) в 2011 г.;
4. «Взаимодействие полей и излучения с веществом» (Иркутск) в 2011 г.;
5. American Geophysical Union's 45th annual Fall Meeting (Сан-Франциско, США) в 2012 г.;
6. Space Climate 5 symposium (Оулу, Финляндия) в 2013 г.;
7. «Физика плазмы в солнечной системе» ИКИ РАН (Москва) в 2014 г.

Работа была поддержана грантом РФФИ 12-02-31531 (Мой первый грант) «Восстановление секторной структуры межпланетного магнитного поля по данным геомагнитных наблюдений в Санкт-Петербурге и Хельсинки во второй половине 19 века».

Личный вклад.

Автор принимал непосредственное участие в постановке задачи, отборе и обработке используемых данных. Все результаты, описанные в диссертации, были получены автором самостоятельно. Большая часть численных расчетов и анализ полученных результатов были выполнены в среде программирования и математических вычислений MATLAB, где автором разрабатывались необходимые алгоритмы.

Публикации.

Основные результаты по теме диссертации изложены в восьми статьях, четыре из которых опубликованы в журналах, рекомендованных ВАК, остальные четыре — в сборниках трудов конференций.

Объем и структура работы.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и приложения. Полный объем диссертации **129** страниц с **71** рисунком и **9** таблицами. Список литературы содержит **88** наименований.

Содержание работы

Во **введении** обосновывается актуальность исследований, формулируется цель и ставятся задачи, указывается научная новизна и практическая значимость представляемой работы. Также приводятся основные положения, выносимые на защиту и список публикаций автора по теме исследования.

Первая глава даёт обзор основных используемых понятий и терминов. Приводится краткое описание солнечного и межпланетного магнитных полей. Объясняется формирование секторной структуры межпланетного магнитного поля (ММП). Дается описание геомагнитного поля и систем координат, в которых осуществляются измерения элементов геомагнитного поля. Третий подраздел кратко объясняет эффект Свальгарда-Мансурова, лежащий в основе представленного метода восстановления секторной структуры ММП.

Вторая глава состоит из трёх разделов и посвящена описанию геомагнитных данных, используемых для восстановления полярности ММП.

В разделе 2.1 дается обзор геомагнитных станций, данные которых использовались в ранних методах восстановления полярности ММП, и объясняется, каким образом выбор станций определяет получаемые результаты. Основным тезисом части является утверждение о том, что восстановление секторной структуры возможно по геомагнитным данным неполярных станций, где раньше всего начали вестись магнитные наблюдения.

В начале следующей части излагается краткая история геомагнитных наблюдений в 19-м веке. Особое внимание уделяется обзору станций в Санкт-Петербурге и Хельсинки. Приводится информация о доступности регулярных почасовых геомагнитных наблюдений, проводившихся в 19-м веке, и дается список станций, данные которых используются для восстановления полярности. Два последующих подраздела посвящены описанию корректировки представленных геомагнитных измерений. В первом представлен подробный отчет об исправлении ложных трендов в используемых данных и о том, в какие периоды эти данные не рассматриваются ввиду сильных сбоя измерительного оборудования. Во втором показано, как выполнялся сдвиг данных, необходимый для приведения измерений к современному формату Всемирного времени (UT).

В разделе 2.3 вводится индекс геомагнитной активности $IHV(1d)$, необходимый специально для представленного метода восстановления полярности в периоды, когда aa -индекс геомагнитной активности был недоступен.

Третья глава представляет собой подробный разбор предлагаемого метода восстановления полярности ММП и состоит из пяти разделов.

В первом разделе исследуется проявление эффекта Свальгарда-Мансурова (С-М) в геомагнитных вариациях: распределение наибольших вариаций эффекта в течение дня и в различные сезоны года. В первую очередь рассматриваются способы определения полярности ММП в ранних методах Свальгарда [5], Мансурова [6] и Веннерстрём [4]. Вводятся диаграммы интенсивности эффекта С-М в разных компонентах геомагнитного поля. Наблюдаемые изменения в эффекте объясняются с точки зрения ДРУ токовой системы, ответственной за исследуемый наземный эффект. С помощью аналогичных диаграмм также показано, что различие геомагнитных вариаций в дни положительной и отрицательной полярностей ММП наблюдается и на средних широтах. Эффект противоположен весной и осенью. Вводится предположение о том, что его источником является кольцевой ток.

В разделе 3.2 вводится весовая функция, с помощью которой по рассчитанным ранее диаграммам определяются весовые коэффициенты геомагнитных вариаций каждого часа в течение года. Значения весов для вариаций тем больше, чем сильнее средняя интенсивность эффекта С-М в конкретный период.

Третий раздел посвящён описанию процедуры расчёта суточной кривой, относительно которой определяются геомагнитные вариации эффекта С-М. Рассматривается проблема зависимости результатов метода от геомагнитной активности, имевшая место в методе Свальгарда [3] и возникающая при использовании суточной кривой, получаемой простым усреднением значений геомагнитного поля. Для решения указанной проблемы вводится метод определения суточной кривой, основанный на усреднении только тех значений поля, которым соответствует тот же уровень геомагнитной активности, что и в исследуемый период. Показано, что получаемые значения действительно дают различные формы суточной кривой в условиях меняющейся геомагнитной активности. В следующем разделе приводятся итоговые формулы для расчёта значений полярности P_i , определяемых как сумма всех «взвешенных» вариаций.

В разделе 3.5 описан процесс корректировки получаемых значений полярности. На основе предположения о квазистационарности солнечного ветра, вводится процедура сглаживания значений P_i с помощью 27-дневных диаграмм Бартельса. Результаты восстановления полярности по данным геомагнитного поля на станции Воейково до и после корректировки, а также полярность по спутниковым данным показаны на рис. 1. Указанная процедура сглаживания позволяет улучшить точность восстановления полярности в среднем на 5%.

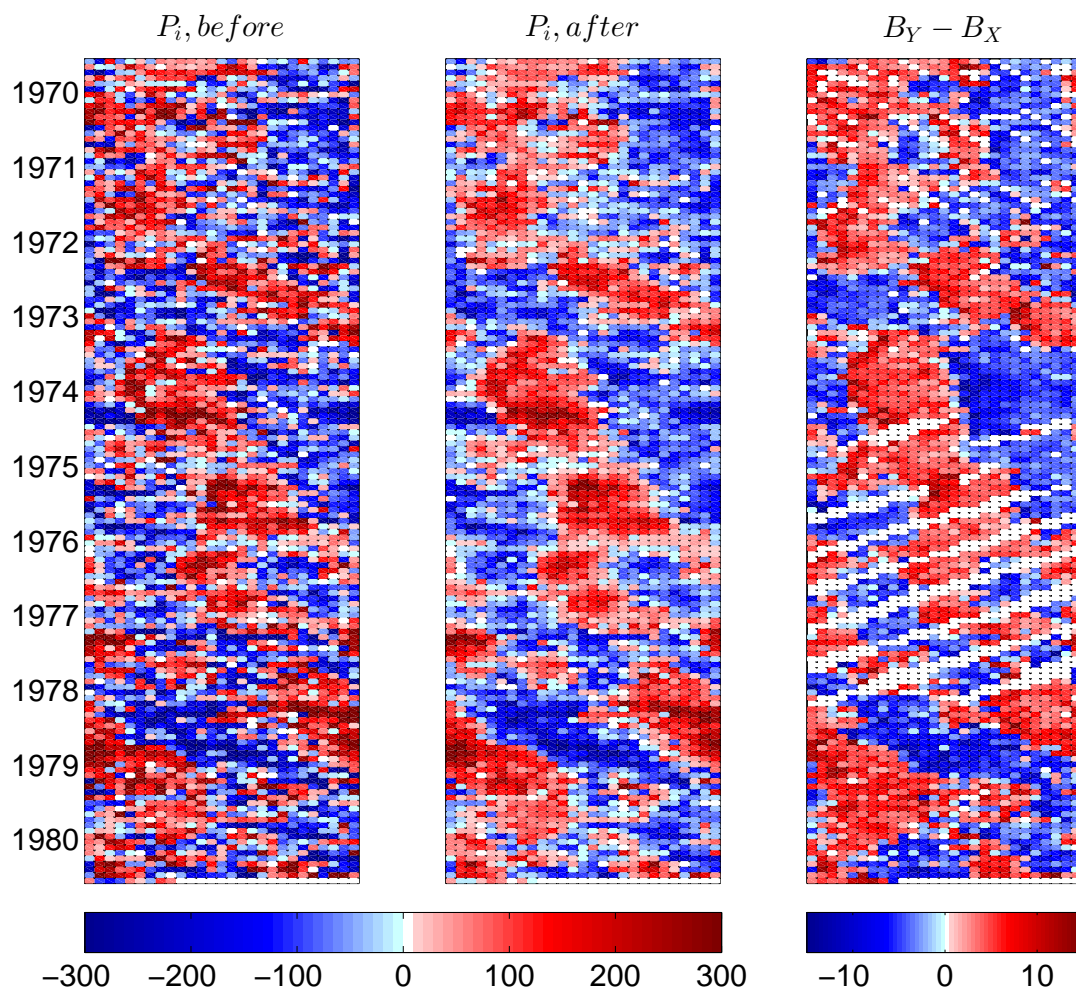


Рис. 1: Восстановленная полярность по данным Санкт-Петербурга: до сглаживания (слева) и после (в центре); справа — полярность ММП по спутниковым данным (1970–1980 гг.)

В конце третьей главы излагается структура предлагаемого метода восстановления полярности ММП:

- Вычисляется среднее годовое распределение различий между характерными суточными кривыми геомагнитного поля для положительной и отрицательной полярностей ММП.
- На основе полученных диаграмм для всех станций и каждой компоненты формируется набор весовых коэффициентов, определяющий время, когда вариации используются для восстановления полярности, а также указывающий на знак различий.
- Суточная кривая фонового геомагнитного поля определяется усреднением значений поля в интервале ΔN в периоды с тем же уровнем геомагнитной активности ($\pm \Delta aa$), что и в исследуемое время. Параметры ΔN и Δaa опреде-

ляются подбором отдельно для каждого месяца, геомагнитной компоненты и станции.

- Итоговые значения восстановленной полярности P_i одной станции вычисляются суммированием взвешенных отклонений для всех доступных геомагнитных компонент.
- Средние величины отрицательных и положительных P_i выравниваются в скользящем 55-дневном интервале.
- Полученные данные сглаживаются в диаграммах Бартельса.

В четвертой главе, состоящей из четырёх разделов, оценивается точность и качество восстановленной секторной структуры ММП.

В части 4.1 объясняется, каким образом определяется полярность по спутниковым данным ММП. Демонстрируется, что ввиду преимущественно спиральности магнитного поля солнечного ветра, в большинстве случаев (~94%) среднесуточная полярность совпадает со знаком азимутальной компоненты ММП, определяемой в GSM системе координат. Поэтому делается вывод о том, что значения P_i , восстановленные с использованием геомагнитных данных, действительно отражают истинную полярность ММП.

В следующем разделе восстановленная полярность сравнивается со спутниковыми данными ММП, доступными начиная с 1965-го года. Оценки приводятся для всех станций, по отдельности для результатов, полученных в разных компонентах геомагнитного поля. Оценки, представленные в таблице 4.2, свидетельствуют о том, что использование геомагнитных данных высокоширотных станций даёт наилучшие результаты — до 82% успешных определений. Тем не менее, секторная структура, восстановленная по данным среднеширотных станций, также хорошо совпадает с полярностью согласно спутниковым измерениям — до ~75% успешных определений.

Затем анализируется точность восстановления полярности для разных станций уже в зависимости от сезона года. На основе представленных графиков точности полярности, реконструированной по вариациям поля на среднеширотных станциях, делается заключение о том, что в определённые месяцы для получения итоговых значений полярности не следует использовать данные всех компонент геомагнитного поля.

Далее в таблице 4.3 приводятся оценки точности восстановления по данным всех станций (с использованием выбранных компонент поля). Количество совпадений варьируются от 73 до 85%, а после применения процедуры корректировки сглаживанием возрастает до 77–88%. В таблице 4.5 демонстрируются оценки точности секторной структуры, полученной для различных групп

данных в соответствии с появлением измерений геомагнитного поля. Начиная с 1844-го года до 1985-го года, с открытием новых магнитных станций точность восстановленной секторной структуры предположительно возрастает с 78 до 90%.

В конце раздела исследуется изменение точности результатов метода от года к году (рис. 2) и делается вывод о том, что худшие результаты наблюдаются в периоды минимумов солнечной и геомагнитной активности. Это позволяет определить периоды в прошлом, когда восстановленная секторная структура возможно содержит большее число ошибок.

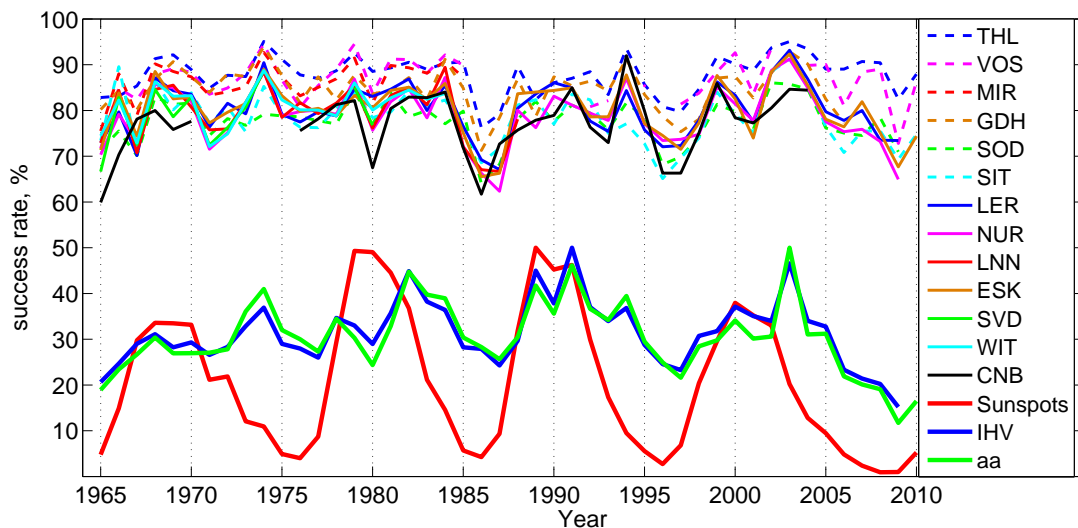


Рис. 2: Среднегодовая точность метода для отдельных станций (тонкие линии в верхней части графика), ниже толстыми линиями изображены среднегодовые значения чисел пятен (красный), $IHV(1d)$ (синий) и aa (зелёный) индексы геомагнитной активности.

Раздел 4.3 посвящён проверке полярности, восстановленной в 19-м веке. В результате сравнения секторных структур ММП, полученных по данным разных компонент, а также сравнения результатов разных станций, предполагается, что измерения склонения геомагнитного поля в Екатеринбурге с 1887-го по 1925-й года вероятно содержат много ошибок. Поэтому полярность, восстановленная по этим данным, не используется для получения итогового каталога секторной структуры ММП. Для остальных станций 19-го века наблюдается высокий процент совпадений $\sim 80\%$, сохраняющийся в течение всего периода исследований, что свидетельствует о достоверности результатов отдельных станций и, соответственно, итогового каталога полярности.

В последнем разделе четвёртой главы исследуется соотношение восстановленной полярности и геомагнитной активности, представленной aa и $IHV(1d)$ -индексами. Демонстрируется, что среднегодовые значения индексов, полученные для дней положительной и отрицательной полярностей, практически одинаковы. Таким образом, независимо от уровня геомагнитной активности

каждый день может быть с одинаковой вероятностью определён как день положительной или отрицательной полярности. Также восстановленная полярность анализируется на предмет наличия эффекта Рассэлла-МакФеррона [7]. Два максимума геомагнитной активности осенью и весной образуются за счёт положительной и отрицательной полярностей ММП соответственно. Так как эффект наблюдается в течение всего доспутникового периода с 1844-го по 1964-й года, делается предположение о высоком уровне достоверности восстановленной секторной структуры ММП.

В пятой главе, состоящей из трёх разделов, проводится анализ восстановленной в доспутниковый период полярности ММП.

В начале главы исследуется периодичность вращения секторных границ. В подразделе 5.1.1 рассматриваются значения, полученные в предшествующих работах, анализировавших периодичность солнечных данных в диапазоне 25–30 дней. В подразделе 5.1.2 периодичность данных восстановленной полярности определяется с помощью алгоритма Ломба-Скаргла [8]. Полученные спектры демонстрируют широкий разброс значений периодов от 26.2 до 29.3 дней. Самые большие пики в спектре наблюдаются вблизи значений 26.9 и 27.2 дней. Также показано, что не существует выделенных значений периодов вращения секторной структуры, которые наблюдались бы постоянно, в любую эпоху.

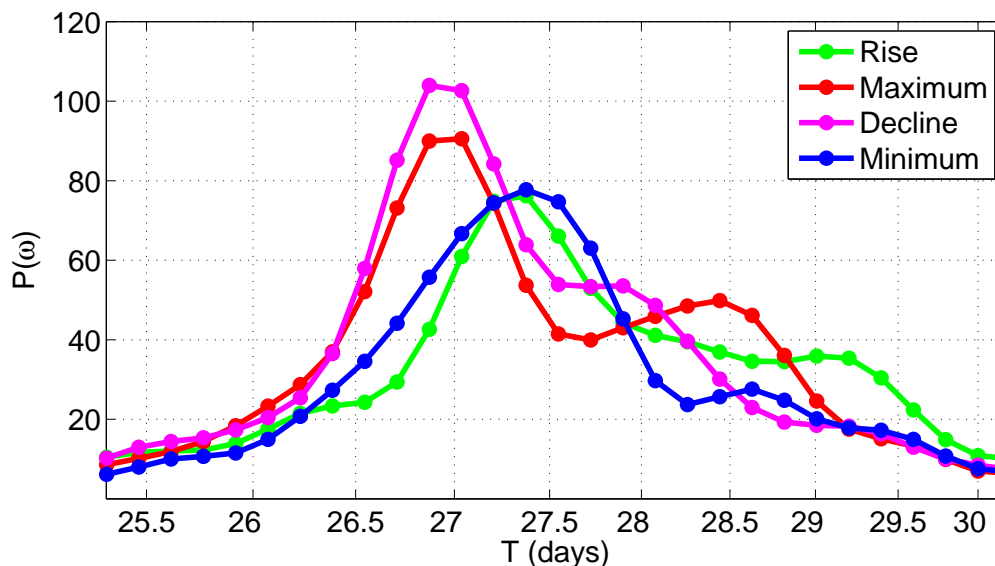


Рис. 3: Спектры вращения секторной структуры ММП для четырёх фаз солнечного цикла в среднем за 1844–2010 гг.

В подразделе 5.1.3 исследуется изменение спектров вращения секторной структуры ММП с развитием цикла солнечной активности (рис. 3). Делается вывод о том, что двухсекторная структура с периодами порядка 28–29 дней чаще наблюдается на фазах роста и максимума солнечной активности, а для фаз спада и минимума более характерны как двухсекторные, так и наблюдаемые ре-

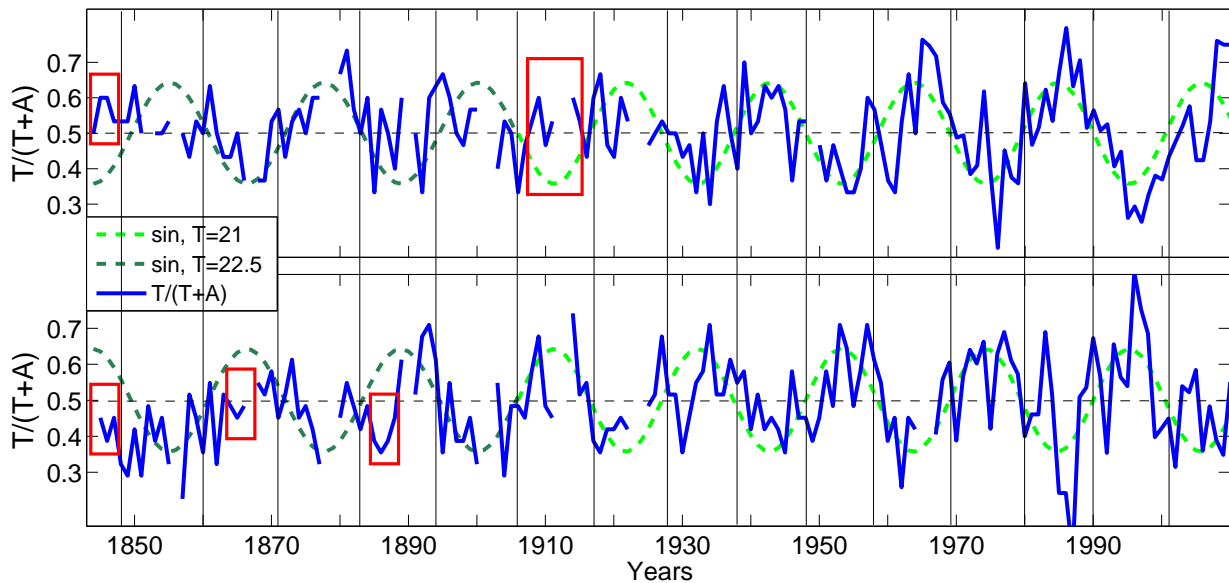


Рис. 4: Отношение числа дней отрицательной полярности T к общему числу дней $(T+A)$; верхний график — в сентябре, нижний — в марте; вертикальные линии — максимумы солнечной активности; пунктиром изображены синусоиды с периодами 21 и 22.5 года, красными рамками — периоды сильного отклонения от эффекта P-K.

же четырёхсекторные структуры, с периодом ~ 27 дней. То есть, с развитием цикла источник крупномасштабного магнитного поля, образующий наблюдаемую в плоскости эклиптики секторную структуру, смещается из области широт $\sim 40-45^\circ$ ($T \approx 29$ дней) к более низким $\sim 20-25^\circ$ ($T \approx 27$ дней).

В разделе 5.2 рассматривается эффект Розенберга-Коулмана: преобладание ММП одной полярности в периоды равноденствий [9]. Сначала даётся обзор предшествующих исследований на эту тему. Наличие эффекта проверяется как отношение количества дней отрицательной восстановленной полярности к общему числу дней в марте и сентябре (то есть вблизи равноденствия) за период 1844–2010 гг. В результате анализа скомпилированных оптимальных данных восстановленной полярности, для которых эффект виден наиболее отчётливо, утверждается, что исследуемое правило хорошо наблюдается в течение всего интервала, за исключением самого раннего периода 1844–1847 гг., а также около минимума 14-го цикла солнечной активности (рис. 4). Таким образом, предполагается, что начиная с ~ 1850 -го года переполюсовка магнитного поля Солнца действительно происходила с известным периодом магнитного цикла Хэйла, порядка 22 лет, и в соответствии с циклами солнечной активности.

Раздел 5.3 посвящён исследованию геоэффективности секторных границ. Даётся краткое описание геомагнитных бурь, и, в частности, супербурь, список которых приводится в таблице 5.1. На основе сравнения дат указанных событий и времени пересечения секторных границ ММП, определённых согласно

восстановленным данным, делается предположение о том, что большинство исследуемых супербурь (13 из 18) пришлось на период смены знака полярности сектора ММП (± 1 день). Также отмечается устойчивая закономерность, когда супербурям на границе секторов в период около весеннего равноденствия чаще предшествует положительный сектор, а «осенним» супербурям, наоборот, сектор отрицательной полярности ММП. Те же особенности характерны и для большего числа событий сильных возмущений, для которых индекс геомагнитной активности S_9 равен максимальному значению 9.

В заключении приводятся основные результаты работы.

Удалось разработать метод, который с высокой точностью ($\sim 80\%$), позволил восстанавливать секторную структуру ММП по геомагнитным вариациям на среднеширотных станциях. В результате полярность была восстановлена вплоть до 1844-го года, что по времени значительно превосходит самый длинный каталог полярностей ММП, полученный ранее группой Веннерстрём для периода с 1905-го года [4]. Таким образом, полученный ряд данных вместе с современными спутниковыми наблюдениями позволяет исследовать свойства секторной структуры ММП и крупномасштабного магнитного поля Солнца за период порядка пятнадцати циклов солнечной активности.

Реконструкция секторной структуры в 19-м веке стала возможной, в частности, благодаря оцифровке наблюдений геомагнитного поля на станции Санкт-Петербург.

Показано, что достоверность восстановленной секторной структуры как в 20-м, так и в 19-м веках находится на высоком уровне. При определении суточной полярности удалось избежать зависимости от геомагнитной активности, характерной для каталога восстановленной полярности ММП, полученного Свальгардом.

Спектральный анализ секторной структуры за период 1844–2010 гг. не показал наличия устойчивых периодов вращения ММП. Самые высокие пики в спектре соответствуют значениям ~ 26.9 и ~ 27.2 дней. Причина такой дискретности пока не ясна. В среднем границы наблюдаемых периодов составляют ~ 26.2 и ~ 29.3 дней, что свидетельствует о распределении источников наблюдаемого в плоскости эклиптики ММП от экваториальных гелиоширот до $\sim 40\text{--}45^\circ$.

Двухсекторная структура — наиболее характерная конфигурация ММП, наблюдается в течение всего цикла солнечной активности, причём на фазе роста и максимума её период часто составляет от 28 до 29.5 дней. Средние значения спектров вращения секторной структуры свидетельствуют о преобладании 27-дневной периодичности в течение всего цикла солнечной активности. Четырёхсекторная структура также с периодом ~ 27 дней более характерна для фазы спада и минимума активности.

Анализ эффекта Розенберга-Коулмана, подтвердил, что, по крайней мере начиная с 9-го цикла активности, то есть до первых наблюдений солнечных магнитных полей, реперолюсовка магнитного поля Солнца действительно происходила в соответствии с правилом магнитного цикла Хэйла.

Сравнение секторных границ ММП и дат сильнейших за всю историю наблюдений геомагнитных возмущений (супербурь), показало, что абсолютное большинство таких событий пришлось на период пересечения Землей гелиосферного токового слоя, то есть на границе смены полярностей ММП. Всем таким событиям в месяцы около осеннего равноденствия предшествовали сектора отрицательной полярности, а для месяцев около весеннего равноденствия большинству событий предшествовали сектора положительной полярности.

Публикации автора по теме диссертации

Статьи в журналах, рекомендованных ВАК:

1. Vokhmyanin M. V., Ponyavin D. I. Inferring interplanetary magnetic field polarities from geomagnetic variations // *J. Geophys. Res.* 2012. Т. 117. С. A06102.
2. Вохмянин М. В., Понявин Д. И. Реконструкция секторной структуры межпланетного магнитного поля по данным геомагнитных станций // *Геомагнетизм и аэрономия.* 2012. Т. 52, № 6. С. 755–762.
3. Vokhmyanin M. V., Ponyavin D. I. Sector structure of the interplanetary magnetic field in the 19th century // *Geophys. Res. Lett.* 2013. Т. 40. С. 3512–3516.
4. Reconstruction of geomagnetic activity and near-Earth interplanetary conditions over the past 167 yr—Part 3: Improved representation of solar cycle 11 / M. Lockwood, H. Nevanlinna, M. Vokhmyanin [и др.] // *Ann. Geophys.* 2014. Т. 32, № 4. С. 367–381.

Другие публикации:

5. Vokhmyanin M. V., Ponyavin D. I. Reconstruction of the IMF polarity from geomagnetic observations // *Proceedings of the 8th International Conference “Problems of Geocosmos” (St. Petersburg, Russia, 20–24 September 2010)*, ed. V. S. Semenov, St. Petersburg Univ. Press. 2010. С. 274–279.
6. Вохмянин М. В., Понявин Д. И. Восстановление межпланетного магнитного поля по геомагнитным наблюдениям // *Труды Всероссийской ежегодной конференции по физике Солнца “Солнечная и солнечно-земная физика—2010”*, под ред. А. В. Степанова и Ю. А. Наговицына, СПб, ВВМ. 2010. С. 97–100.

7. Вохмянин М. В., Понявин Д. И. Восстановление секторной структуры межпланетного магнитного поля во второй половине 19 века // Труды Всероссийской ежегодной конференции по физике Солнца “Солнечная и солнечно-земная физика—2012”, под ред. А. В. Степанова и Ю. А. Наговицына, СПб, ВВМ. 2012. С. 39–42.
8. Вохмянин М. В., Понявин Д. И. Межпланетное магнитное поле в 19-м веке и геоэффективные секторные границы // Труды Всероссийской ежегодной конференции по физике Солнца “Солнечная и солнечно-земная физика—2013” под ред. А. В. Степанова и Ю. А. Наговицына, СПб, ВВМ. 2013. С. 51–54.

Список цитируемой литературы

1. Svalgaard L. Interplanetary magnetic-sector structure, 1926–1971 // J. Geophys. Res. 1972. Т. 77(22), № 22. С. 4027–4034.
2. On the inference of sector polarity of the interplanetary magnetic field from the types of geomagnetic variations at near-polar stations / S. M. Mansurov, L. G. Mansurova, G. R. Heckman [и др.] // IAGA Bulletin 34. 1973. Т. 610.
3. Russell C. T., Rosenberg R. L. On the limitations of geomagnetic measures of interplanetary magnetic polarity // Sol. Phys. 1974. Т. 37. С. 251–256.
4. Vennerstroem S., Zieger B., Friis-Christensen E. An improved method of inferring interplanetary sector structure, 1905-present // J. Geophys. Res. 2001. Т. 106, № A8. С. 16011–16020.
5. Svalgaard L. An Atlas of Interplanetary Sector Structure 1947–1975. Institute for Plasma Research, Stanford University, 1975.
6. Мансуров С. М. Полярность межпланетного магнитного поля за период 1957–1983 гг. // Препринт № 52(526). 1984. С. 1–29.
7. Russell C. T., McPherron R. L. Semiannual variation of geomagnetic activity // J. Geophys. Res. 1973. Т. 78, № 1. С. 92–108.
8. Scargle J. D. Studies in astronomical time series analysis. II—Statistical aspects of spectral analysis of unevenly spaced data // Astrophys. J. 1982. Т. 263. С. 835–853.
9. Rosenberg R. L., Coleman P. J. Heliographic latitude dependence of the dominant polarity of the interplanetary magnetic field // J. Geophys. Res. 1969. Т. 74, № 24. С. 5611–5622.