

УДК 523.94

Высотная стратификация солнечных магнитных полей в 21–23 циклах

Н.Н. Степанян¹, З.С. Ахтемов¹, В.Г. Файнштейн², Г.В. Руденко²

¹ НИИ «Крымская астрофизическая обсерватория», Научный, АР Крым, Украина, 98409
nataly@crao.crimea.ua

² Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Российская Федерация, 664033

Аннотация. Радиальная компонента магнитного поля Солнца B_r была рассчитана в потенциальном приближении в интервале высот от 1 до 2.5 радиуса Солнца R_\odot . По этим данным построены синоптические карты магнитного поля для солнечных циклов 21–23. Для каждой 10-градусной широтной зоны найдена доля ее площади S_{+field} , занятая «+» полем в каждом обороте. Было принято, что во всей широтной зоне радиальная компонента поля имеет знак «+», если $S_{+field} \geq 80\%$, и знак «-», если $S_{+field} \leq 20\%$.

Оказалось, что на уровне фотосферы ($R = R_\odot$) поле практически униполярное в течение большей части цикла от полюсов до северной и южной широты $\approx 60^\circ$. В окрестности минимумов между 21 и 22 циклами, а также 22 и 23 циклами в течение нескольких оборотов Солнца поле оказывается практически униполярным в диапазоне широт $(-40^\circ) - 90^\circ$. На $R = 2.5 R_\odot$ в течение большей части каждого цикла поле униполярное в диапазоне широт $(-20^\circ - (-90^\circ))$ и $(20^\circ - 90^\circ)$. Согласно нашей интерпретации, смещение границы полярного поля к экватору с высотой отражает сверхрадиальное расширение открытых магнитных трубок из полярных корональных дыр. Найдено, что переполюсовка полярных полей начинается на 1–2 оборота и заканчивается от 2 до 14 оборотов Солнца раньше на больших высотах, чем на поверхности Солнца. Это свидетельствует о том, что вначале происходит переполюсовка крупномасштабного поля, а затем мелкомасштабного. При исследовании секторной структуры магнитного поля на разных высотах, оказалось, что границы, вращающиеся с периодом меньше кэррингтоновского, простираются до больших высот, чем границы с кэррингтоновским и более длинным периодом. Мы предполагаем, что границы первого типа образуются крупномасштабными структурами магнитного поля, границы второго типа определяются активными областями.

HEIGHT STRATIFICATION OF SOLAR MAGNETIC FIELDS IN CYCLES 21–23, *by N.N. Stepanian, Z.S. Akhtemov, V.G. Fainstein, G.V. Rudenko*. The radial component of the solar magnetic field B_r was calculated in the potential approximation in the height range from 1 to 2.5 solar radius R_\odot . According to these data synoptic maps of the magnetic field for solar cycles 21–23 were constructed. For every 10-degree latitude zone the proportion of its area S_{+field} , occupied by "+" field in each solar rotation was found. In the entire latitude zone a radial component of the field is assumed to be positive, if $S_{+field} \geq 80\%$ and negative – if $S_{+field} \leq 20\%$. The field proved to be virtually unipolar at the level of the photosphere ($R = R_\odot$) during most of the cycle, from the poles to the north and south latitude $\approx 60^\circ$. In the vicinity of minimum between cycles 21 and 22, and cycles 22 and 23 for a few rotations of the Sun the field is almost unipolar at latitudes $(40^\circ) - 90^\circ$. At $R = 2.5R_\odot$ for

most of each cycle the unipolar field was observed in the latitude range (20° – 90°), and (20° – 90°). According to our interpretation, the shift of the boundaries of the polar field to the equator with height reflects superradial expansion of open magnetic flux tubes from the polar coronal holes. It was found that the reversal of the polar fields begins 1–2 rotations, and finishes from 2 to 14 solar rotations before at high heights than at the surface of the Sun. This indicates that the first large-scale field reversal occurs, and then the small-scale. In the study of the sector structure of the magnetic field at different heights, it was found that the boundaries, rotating with a period of less than Carrington one, extend to greater heights than the boundaries with Carrington and a longer period. We assume that the boundaries of the first type are formed by the large-scale structure of the magnetic field, the boundaries of the second type are determined by active regions.

Ключевые слова: Солнце, магнитные поля, эволюция, высотная стратификация

1 Введение

До настоящего времени регулярные измерения солнечного магнитного поля проводились лишь на уровне фотосферы (Соланки и др., 2006). И хотя отдельные измерения магнитного поля в хромосфере и короне, опирающиеся на эффекты Зеемана, Ханле, Фарадея, а также на измерения солнечного радиоизлучения, время от времени проводятся, использовать их для выяснения свойств магнитного поля на различных высотах в течение больших промежутков времени (период вращения Солнца и более) не представляется возможным. Единственным, по существу, способом решения такой задачи, опирающейся на измерения фотосферного магнитного поля, является использование результатов расчетов магнитного поля в короне в потенциальном приближении (Шатен и др., 1969; Альтшулер и др. 1977; Хоексема, 1984; Ванг и Шили, 1992; Руденко, 2001).

Общей, хорошо известной закономерностью изменения магнитного поля с высотой в хромосфере, а затем в короне, является переход от сильной структурированности поля на уровне фотосферы на небольших пространственных масштабах к существенному увеличению пространственного масштаба изменения поля на высоте $R = (1.6-3.25)R_\odot$, где R_\odot – радиус Солнца. При этом сильная структурированность фотосферного поля наблюдается как по измерениям поля с высоким пространственным разрешением (инструменты SOLIS (<http://solis.nso.edu/>), SOHO/MDI (<http://soi.stanford.edu/>), так и с низким (<http://wso.stanford.edu/>). В то же время, характер изменения с высотой структурированности магнитного поля изучен слабо.

Временной масштаб изменения магнитного поля варьируется в широком диапазоне от нескольких десятков секунд (предельное временное разрешение современных магнитографов) до нескольких периодов вращения Солнца, а также до длительности одиннадцатилетнего цикла и более. Особый интерес представляют вариации поля на масштабе времени ~ 11 лет, т. к. эти вариации тесно связаны с механизмами генерации магнитного поля под фотосферой, описываемыми в рамках теоретических моделей солнечного динамо (Вейс и Томпсон, 2009; Нанди и Диббаенду, 2011).

Одним из самых интересных явлений, сопровождающих наблюдаемые вариации магнитного поля на Солнце в цикле солнечной активности, является «переполусовка» полярного магнитного поля в максимуме солнечной активности, когда в течение относительно короткого времени преимущественный знак полярного магнитного поля в каждой полусфере меняется на противоположный. Первым переполусовку полярного магнитного поля обнаружил Бэбкок (1959). В своей работе Бэбкок (1961) предложил механизм переполусовки, основанный на наблюдениях, согласно которым хвостовые части биполярных областей расширяются и

мигрируют к полюсам. Он предположил, что когда эти части биполярных групп достигают полярных областей, их магнитное поле, имеющее противоположный полярному полю знак, нейтрализует полярное поле и затем создает в полярной области поле противоположного знака. Бэбкок не смог объяснить причину такой миграции среднеширотных полей к полюсам, и предположил существование меридионального движения к полюсам. Лейтон (1964) предложил в качестве механизма «доставки» магнитного потока к полюсам диффузию, опираясь также на закон Хейла и наклон к экватору оси биполярной области и не предполагая существование меридионального движения.

В дальнейшем идеи Бэбкока и Лейтона развивались во многих работах. Был уточнен коэффициент диффузии магнитного поля, который оказался равным 200–400 км²/с. В нескольких работах с помощью прямых измерений было показано существование меридиональных течений в направлении полюса (см. Лабонт и Говард, 1982; Топка и др., 1982, и цитируемую в этих работах литературу). В этих работах была оценена скорость меридионального движения: ~20–40 м/с. В серии работ, выполненных Шили с соавторами (см. Ванг и др., 1989, и цитируемую в них литературу), была разработана модель эволюции поверхностного магнитного поля и переполусовки полярного поля, включающая решение уравнения транспортировки магнитного потока с учетом диффузионного влияния супергрануляционных движений, меридиональных потоков и дифференциального вращения. Позднее в серии работ (см. Мюррей и Вилсон, 1992, и цитируемую в этой работе литературу) было показано, что при рассмотрении процесса переполусовки полярного поля необходимо учитывать всплывание мелкомасштабного магнитного поля. Подробно современные модели переполусовки полярного поля обсуждаются в работе Дюрант и др. (2004)

Отметим одну интересную особенность переполусовки полярного поля. Было обнаружено, что в четных циклах в одной из полусфер может наблюдаться трехкратная переполусовка (Макаров и Сивараман, 1989). Были приведены аргументы, согласно которым существование трехкратной переполусовки связано с существованием 22-летнего и квазидвухлетнего циклов (Беневоленская и Макаров, 1992)

Данная статья является продолжением работы «Высотная стратификация магнитных полей на Солнце в 23 цикле» (Файнштейн и др., 2011). Поставленные в ней задачи, решенные по материалам 23 цикла, рассматриваются в настоящей работе для трех циклов – с 21-го по 23-й.

Объектами исследования являются структуры магнитного поля (в основном, крупномасштабные) и границы между ними на высотах от фотосферы до поверхности источника для кэррингтоновских оборотов CR 1625–CR 2006 (1975–2003 гг.). Исходным материалом для исследования послужили ежедневные магнитограммы продольного фотосферного магнитного поля высокого пространственного разрешения, полученные магнитографом KPNO (США) и, для нескольких месяцев 2003 г., магнитографом SOLIS (NSO, США).

С использованием этих материалов решены следующие задачи:

- Проведен расчет трех компонент магнитного поля в пространстве от фотосферы (т. е. от поверхности Солнца радиусом R_{\odot}) до поверхности источника – сферы радиусом $R_s = 2.5 R_{\odot}$.
- Построены синоптические карты радиальной компоненты магнитного поля B_r на десяти высотах в атмосфере Солнца.
- Определены следующие характеристики магнитного поля:

– доля площади 10-градусных широтных зон в процентах, занимаемая «+» магнитным полем на синоптических картах для всех рассмотренных оборотов Солнца и на всех

Высотная стратификация солнечных магнитных полей...

- рассмотренных высотах («+» означает направление радиальной компоненты магнитного поля от Солнца (N-поле), «-» – к Солнцу (S-поле));
- длительности преимущественного знака (положительного или отрицательного) в каждой из выделенной широтной зоны в зависимости от высоты;
- долгота границ между секторами с разной преимущественной полярностью магнитного поля в зонах шириной 40 градусов по широте в каждом полушарии Солнца.
- Выявлены особенности изменения со временем магнитного поля на разных высотах в период смены знака полярного магнитного поля.

2 Расчет радиальной компоненты магнитного поля B_r на десяти расстояниях от поверхности Солнца и построение синоптических карт

Описание расчетов B_r для разных высот уже приводилось в нашей предыдущей работе (Файнштейн и др., 2011). Для цельности изложения материала мы повторим это описание. Расчеты магнитного поля в короне проводились в рамках модели «потенциальное поле – поверхность источника». В рамках этой модели в потенциальном приближении рассчитывались три компоненты магнитного поля в пространстве между фотосферой и поверхностью источника. При этом использовалась так называемая «радиальная коррекция». Считалось, что на внутренней границе расчетной области (фотосфера) измеряемое магнитное поле является радиальным (Ванг и Шили, 1992). В данных расчетах поля использовалось разложение потенциала поля по 30 гармоникам сферических функций. На поверхности Солнца это соответствует пространственному разрешению примерно 102 угловых секунд. Формирование синоптических карт радиальной компоненты поля B_r осуществлялось стандартным образом. На сферической поверхности фотосферы радиальное магнитное поле усреднялось в фиксированных точках по магнитограммам, в пределы которых эти точки попадали, с учетом весового коэффициента для каждой магнитограммы. В результате основной вклад вносили магнитограммы, для которых анализируемые точки оказывались вблизи центрального меридиана. Эта процедура осуществлялась с шагом 1° по долготе до полного покрытия выбранной сферической поверхности.

Для исследования использовались синоптические карты, построенные на нескольких высотах. В данной статье их 10 (обозначены H0–H9), и они приведены ниже. Высоты рассчитываются от центра Солнца в радиусах Солнца R_\odot :

H0 – R_\odot (фотосфера), H1 – $1.0036 R_\odot$, H2 – $1.0144 R_\odot$, H3 – $1.10 R_\odot$, H4 – $1.25 R_\odot$, H5 – $1.50 R_\odot$, H6 – $1.75 R_\odot$, H7 – $2.00 R_\odot$, H8 – $2.25 R_\odot$, H9 – $2.5 R_\odot$.

Таким методом были построены синоптические карты кэррингтоновских оборотов CR 1825 – CR 2006. Это соответствует периоду времени январь 1973 г. – июль 2003 г. В качестве примера на рис. 1 приведены синоптические карты одного оборота Солнца для трех высот в солнечной атмосфере.

3 Вариации полярности магнитного поля с высотой в зависимости от времени

Синоптические карты были разбиты на 10-градусные широтные зоны в каждом полушарии. Для северного полушария эти диапазоны широт составили $[0^\circ - 10^\circ]$; $[10^\circ - 20^\circ]$ и т. д., в южном полушарии – $[0^\circ - (-10^\circ)]$; $[(-10^\circ) - (-20^\circ)]$ и т. д. Для каждой зоны определена доля площади зоны в процентах, занятая «+» полем. Назовем ее S_{+field} . Все кривые $S_{+field}(T)$, где T – время в солнечных оборотах, были сглажены скользящим средним по 5 оборотам.

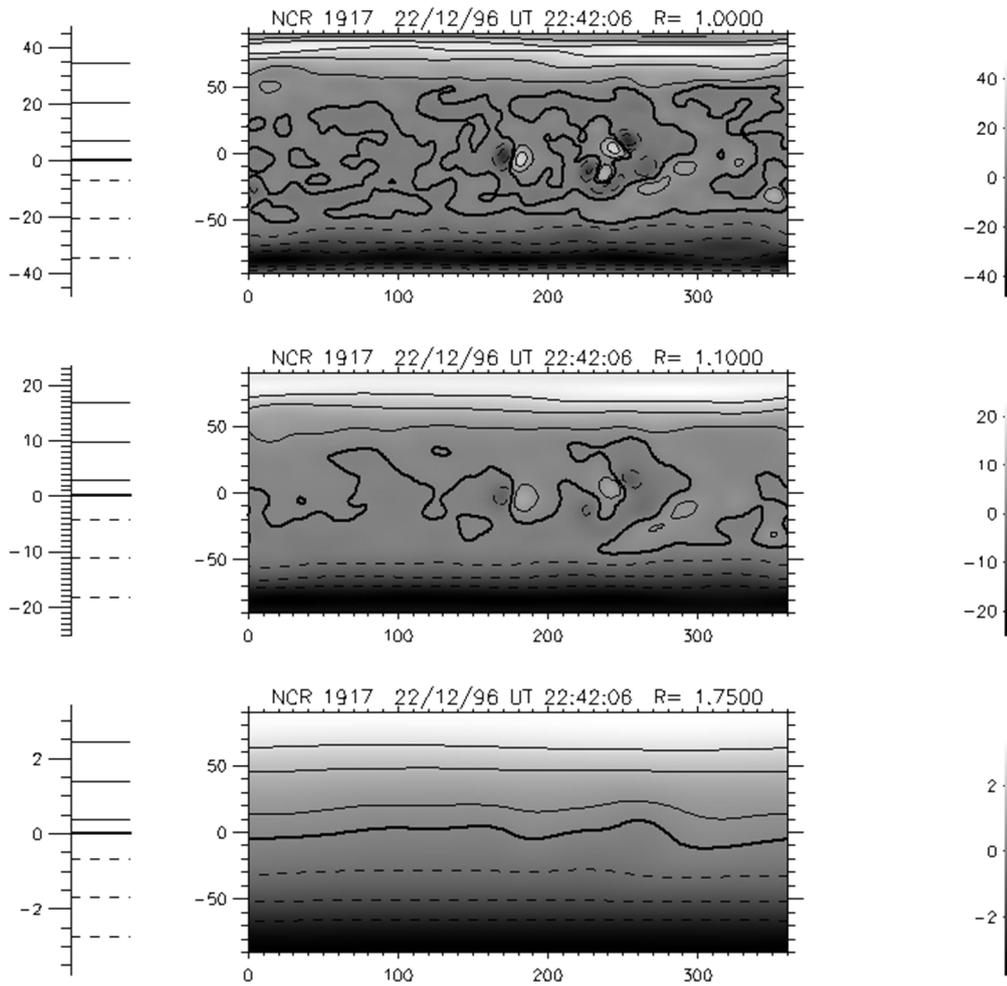


Рис. 1. Синоптические карты радиальной компоненты B_r магнитного поля Солнца на высотах R_\odot , $1.1R_\odot$ и $1.75R_\odot$

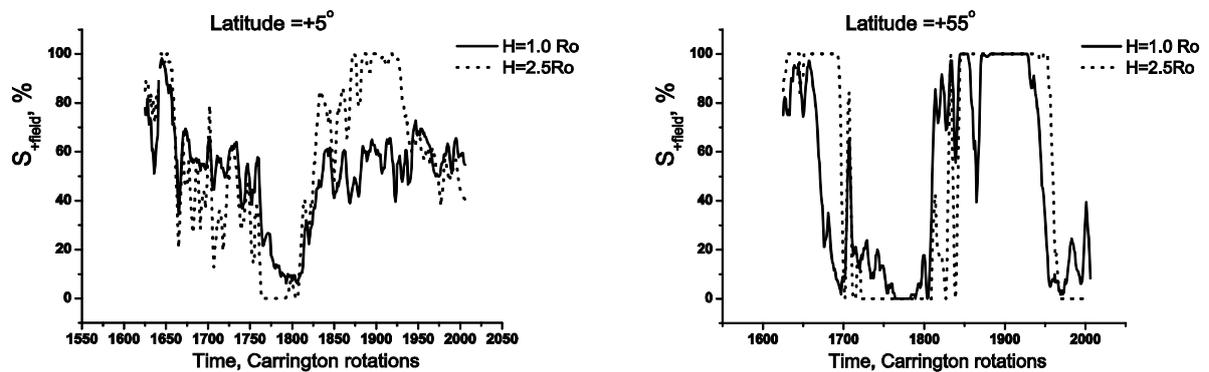


Рис. 2. Изменение со временем распределения «+» поля на высотах $1 R_\odot$ и $2.5 R_\odot$ отдельно для широтных зон $+5^\circ$ и $+55^\circ$

Высотная стратификация солнечных магнитных полей...

Графики для всех широт и высот (типа показанных на рис. 2) позволяют выявить несколько особенностей поведения S_{+field} со временем и с высотой. Характер изменения этого параметра на разных высотах во всех рассмотренных 10-градусных зонах заметно различается в окрестности трех рассмотренных минимумов солнечной активности. Так, например, в приэкваториальной зоне (широта центра зоны равна 5°) в окрестности минимума между 22 и 23 циклами активности на $R = R_\odot$ величина S_{+field} примерно равна 0.55 в течение времени ≈ 100 кэррингтоновских оборотов (CR). А в окрестности минимума между 21 и 22 циклами $S_{+field} \approx 7\%$ в течение около 18 оборотов, в окрестности минимума между 20 и 21 циклами $S_{+field} \approx 95\%$ в течение ≈ 5 оборотов. С ростом высоты площадь положительного магнитного поля S_{+field} в 10-градусных по широте зонах стремится к 100% (0%) в окрестности минимума солнечной активности. На $H = 2.5 R_\odot$ эти значения положительного поля наблюдаются в течение $\approx 55, 45$ и 12 оборотов в окрестности минимумов между 22 и 23 циклами (100%), 21 и 22 циклами (0%) и между 20 и 21 циклами (100%).

В полярной широтной зоне с широтой центра зоны на 85° в окрестности минимума между 22 и 23 циклами в течение ≈ 80 оборотов на всех высотах $S_{+field} \approx 100\%$. В окрестности других минимумов $S_{+field} \approx 100\%$ (0%) лишь на $R = 2.5 R_\odot$ в течение нескольких десятков оборотов.

На рис. 3 представлено изменение $S_{+field}(T)$ для 4 широтных зон в окрестности максимума 21 цикла на высоте $H = R_\odot$ в северной полусфере (левый рисунок) и в южной полусфере (правый рисунок). 4 кривые относятся к 10-градусным широтным зонам с центральными широтами $55^\circ, 65^\circ, 75^\circ$ и 85° .

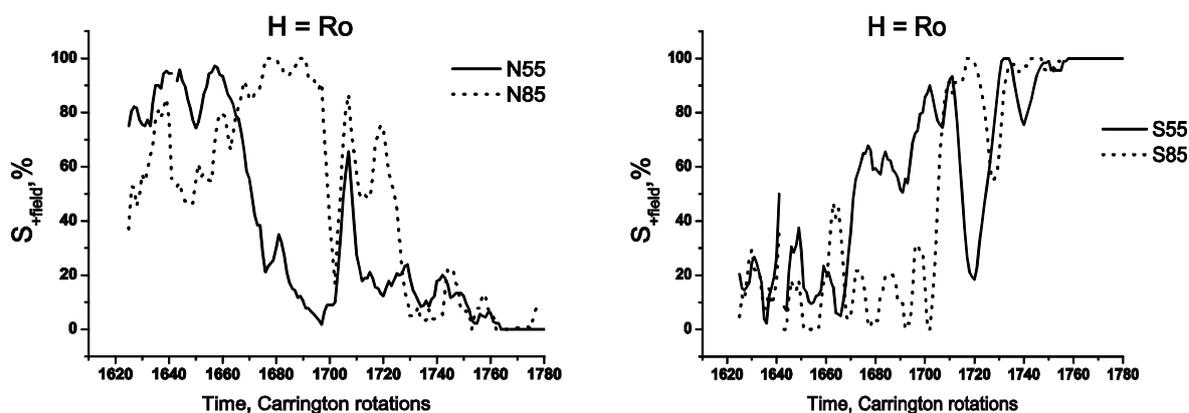


Рис. 3. Изменение $S_{+field}(T)$ в 21 цикле в северной (N) и южной (S) полусферах на высоте $H = R_\odot$. 2 кривые относятся к 10-градусным широтным зонам с центральными широтами 65° и 85°

Рисунок 3 иллюстрирует изменение величины S_{+field} в окрестности максимума активности в период переполусовки. Этот процесс детально мы будем обсуждать ниже. Здесь же заметим, что на $H = R_\odot$ процесс переполусовки в обоих полусферах в полярной области начинается раньше в широтных зонах, расположенных ближе к экватору.

Примем, что во всей широтной зоне поле имеет знак «+», если $S_{+field} \geq 80\%$, и знак «-», если $S_{+field} \leq 20\%$. Поскольку такие униполярные зоны на низких высотах чаще всего относятся к высоким широтам вплоть до полюса, назовем такое поле полярным.

На рис. 4 представлены изменения со временем широтных распределений знака полярного поля на разных высотах в атмосфере Солнца.

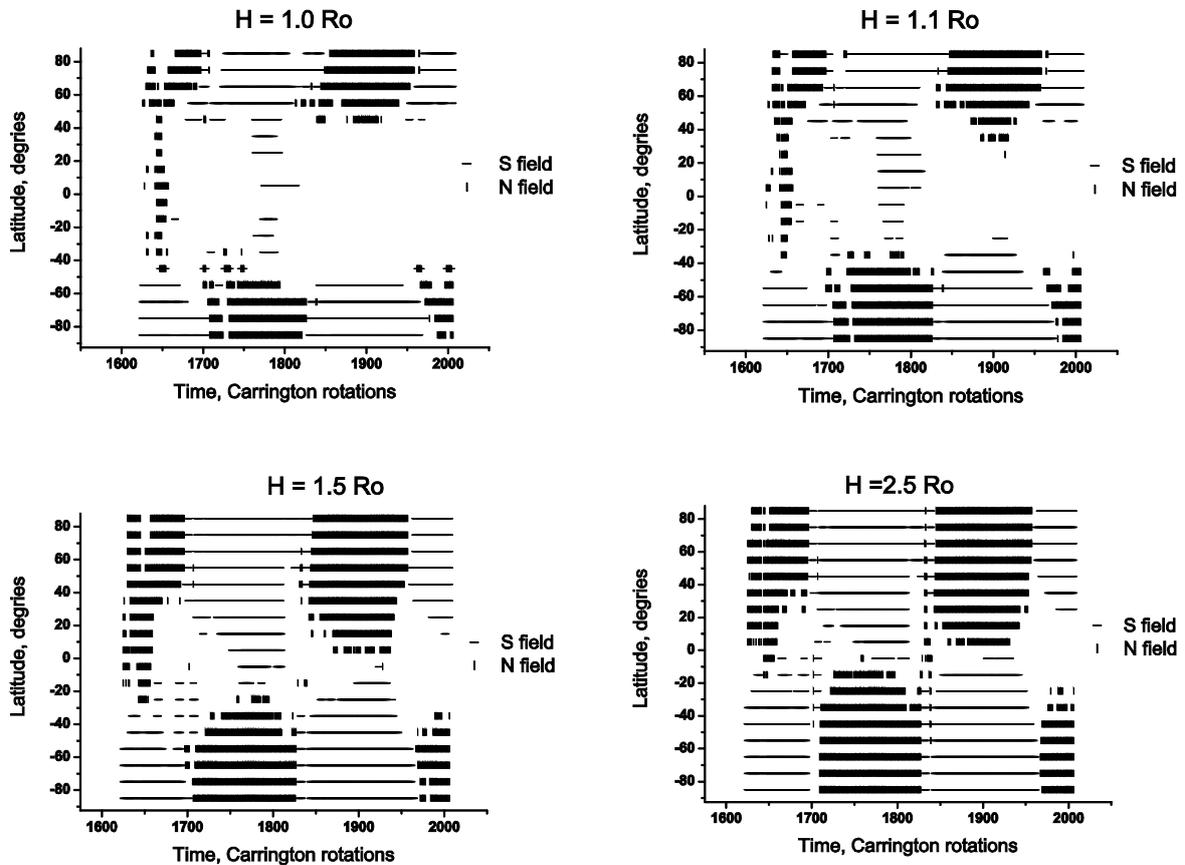


Рис. 4. Изменение со временем широтного распределения полярного поля на четырех высотах в атмосфере Солнца (1, 1.1, 1.5 и 2.5 радиуса фотосферы от центра Солнца). Полосы из вертикальных штрихов – широтные зоны, занятые «+» полем ($S_{+field} \geq 80\%$), полосы из горизонтальных штрихов – широтные зоны, занятые «-» полем ($S_{+field} \leq 20\%$)

Сравнение графиков рис. 4 показывает, что в минимумах солнечной активности и в прилегающих периодах спада и роста активности граница полярного магнитного поля приближается к экватору с ростом высоты. Такое поведение границы полярного магнитного поля можно интерпретировать следующим образом. Известно, что в рассмотренные периоды солнечной активности в полярных областях существуют корональные дыры. Крупномасштабное магнитное поле в них формируется открытыми магнитными трубками, площадь поперечного сечения которых с высотой меняется не пропорционально R^2 , а по закону: $S(R) = S(R_\odot)(R/R_\odot)^2 f(R)$, где $S(R_\odot)$ – площадь основания трубки на $R = R_\odot$, $f(R) > 1$. Максимальное значение $f(R)$ в отдельных трубках варьируется от 2–3 до нескольких десятков единиц и зависит от $S(R_\odot)$. Такое поведение магнитного поля в корональных дырах называется сверхрадиальной расходимостью магнитных трубок или силовых линий магнитного поля в этих трубках. Указанные закономерности расширения магнитных трубок из неполярных корональных дыр по данным расчета магнитного поля в короне в потенциальном приближении обсуждаются в работе (Еселевич и др., 1990). С учетом этого должно происходить смещение с высотой границы полярного поля к экватору в магнитных трубках со сверхрадиальной расходимостью. Другими словами, смещение с высотой границы полярного поля к экватору

Высотная стратификация солнечных магнитных полей...

отражает сверхрадиальное расширение открытых магнитных трубок из полярных корональных дыр.

По полученным данным (рис. 4) можно уверенно говорить о трех переполусовках в рассмотренный период времени и четырех интервалах времени существования униполярных полей на широтах выше 80° .

Анализ показанного на рис. 4 изменения со временем, с высотой и широтой границы полярного поля в обоих полушариях позволяет выделить следующие основные моменты.

- Длительность периода, когда полярные поля сохраняют один знак, составляет 100–120 оборотов (7–9 лет).
- Начало униполярного периода в N- и S-полушариях происходит с разрывом в несколько оборотов.
- В минимуме, а также на фазе роста и спада солнечной активности, с высотой нижняя граница полярного поля приближается к экватору.
- В периоды минимума активности, т. е. в моменты, когда на Солнце преобладает дипольная компонента магнитного поля, граница между «+» и «-» полями часто не проходит по экватору, а смещается до широты -20° .

4 Процесс переполусовки полярного поля

Рассмотрим подробнее изменение «+» магнитного поля на разных высотах в атмосфере Солнца на примере зоны с широтой центра 75° в северной полушарии. На рис. 5 показано изменение со временем величины S_{+field} на четырех высотах в окрестности максимумов трех циклов.

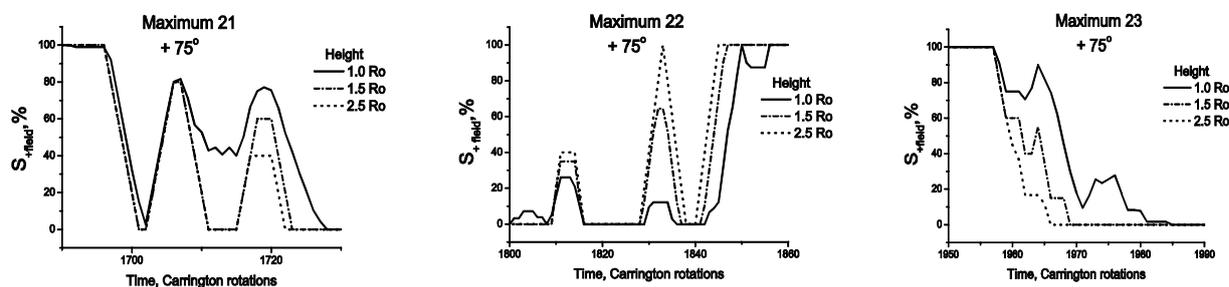


Рис. 5. Изменение со временем площади, занимаемой «+» магнитным полем, в широтной зоне 75° (в процентах) на высотах 1.0, 1.5 и 2.5 радиуса Солнца при фазах максимума 21-го, 22-го и 23-го солнечных циклов

Из рис. 5 следует, что процесс переполусовки длится примерно 20–50 оборотов. Остановимся отдельно на каждом из трех циклов солнечной активности.

21 цикл

После завершения первой переполусовки во время оборота CR 1702 следует выброс «+» поля. Он заметен на всех широтах выше 35° и одновременно на всех высотах. Второй выброс «+» поля с максимумом в обороте CR 1720 захватил все северное полушарие и все высоты. В то же время видно, что амплитуда второго выброса уменьшается с высотой. И, наконец, во время оборота CR 1728 севернее широты 65° установилось «-» поле. Обратим внимание на то, что вблизи поверхности Солнца амплитуда обоих выбросов достигает значительной величины –

примерно 80 %. Уменьшение величины S_{+field} между двумя выбросами «+» поля происходит до ≈ 50 %. В первом приближении структуру из двух выбросов и участка между ними можно рассматривать как двукратную переполюсовку с изменением знака полярного поля с « \leftarrow » на «+» и обратно на « \leftarrow ». Тогда, в целом, на $H = R_{\odot}$ изменение со временем S_{+field} в максимуме 21 цикла можно интерпретировать как трехкратную переполюсовку. На высоте $H = 2.5 R_{\odot}$ амплитуда второго выброса составляет примерно 40 %. В этом случае переполюсовку на данной высоте можно рассматривать либо как трехкратную переполюсовку, заканчивающуюся раньше, чем на уровне фотосферы, либо как тенденцию к пятикратной переполюсовке, которая в полной мере не проявилась.

22 цикл

В 22 цикле смене знака полярного поля предшествовали два выброса «+» поля. Окончательно полярное поле стало положительным к обороту CR 1855. Заметим, что на $H = R_{\odot}$ выбросы положительного поля относительно невелики. Если их рассматривать как флуктуации знака поля, то можно говорить о том, что в этом цикле на уровне фотосферы переполюсовка оказалась однократной. В то же время на высоте $H = 2.5 R_{\odot}$ переполюсовка была как минимум трехкратной.

23 цикл

В 23 цикле скорее можно говорить об однократной переполюсовке на всех высотах. Тем не менее, на низких высотах наблюдаются заметные вариации S_{+field} со временем, но они похожи на случайные флуктуации.

Отметим одну интересную особенность переполюсовки, которая обнаруживается на рис. 5. Завершение переполюсовки происходит раньше на больших высотах ($H = 2.5 R_{\odot}$), чем на поверхности Солнца ($H = R_{\odot}$). Поскольку на больших высотах свойства магнитного поля, в основном, определяются его крупномасштабными структурами, или, что то же самое, самыми низкими гармониками в разложении потенциала поля по сферическим гармоникам (это косвенно вытекает, например, из синоптических карт на рис. 1), то на основании рис. 5 можно сделать вывод, что раньше переполюсовка заканчивается в крупномасштабных структурах поля, а уже затем в мелкомасштабных. Заметим, что ранее в работе Шелтинг и Обридо (2001) был сделан вывод, что на поверхности источника переполюсовка полярного поля происходит на 1.1 год раньше, чем на уровне фотосферы. Как показывают наши результаты, различие времени завершения переполюсовки поля в полярной области между фотосферой и поверхностью источника зависит от цикла солнечной активности и может варьироваться в диапазоне от 6 до 16 кэррингтоновских оборотов.

5 Секторная структура Солнца в широтных промежутках $[0-40^{\circ}]$ и $[0-(-40^{\circ})]$

Для всего рассматриваемого интервала времени была определена секторная структура магнитного поля в солнечной атмосфере на всех десяти указанных выше высотах. Для этого была использована методика, описанная в работе Файнштейна и др. (2011). Напомним ее основные моменты. На всех синоптических картах, отдельно для каждого полушария, находились долготные распределения значений B_g , усредненных по широте в интервале $0^{\circ}-40^{\circ}$. Область вдоль долготы, занятую полем одного знака, назовем сектором. Точки, в которых происходила смена знака поля в соседних секторах, – границами секторов. Во всех случаях отдельно фиксировались точки перехода знака поля от «+» к « \leftarrow » (граница +/ \leftarrow) и от « \leftarrow » к «+» (граница \leftarrow /+) при росте долготы.

Высотная стратификация солнечных магнитных полей...

На рис. 6 приведены долготы +/- и -/+ границ секторов на высоте $2 R_{\odot}$ в зависимости от времени для 21 и 22 циклов солнечной активности. В следующих разделах мы обсудим полученные распределения долгот границ секторов.

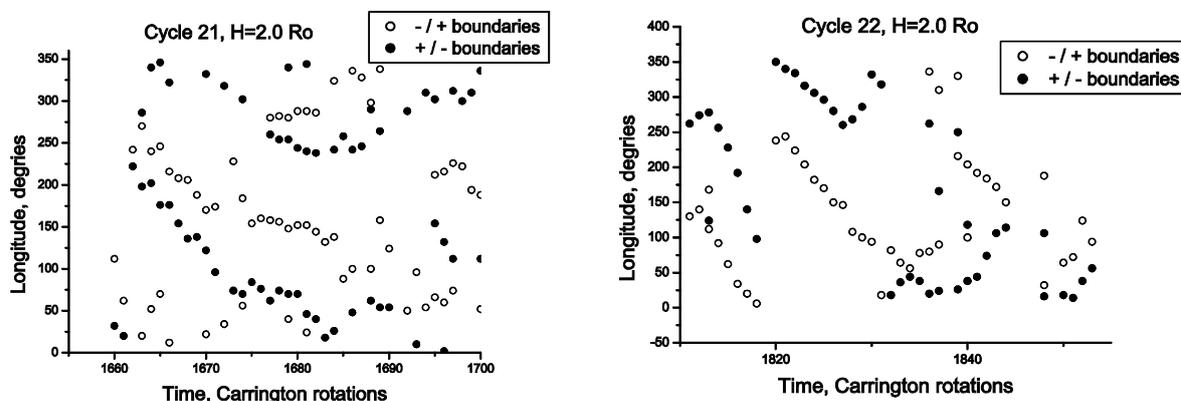


Рис. 6. +/- и -/+ границы секторов на высоте $2 R_{\odot}$ для 21 (слева) и 22 (справа) циклов солнечной активности

5.1 Изменение секторной структуры с высотой и временем

Было подсчитано число границ секторов на всех высотах для каждого оборота Солнца. Результат такого подсчета со сглаживанием скользящим средним по 13 оборотам (примерно 1 год) для границ +/- в N-полусфере дан на рис. 7.

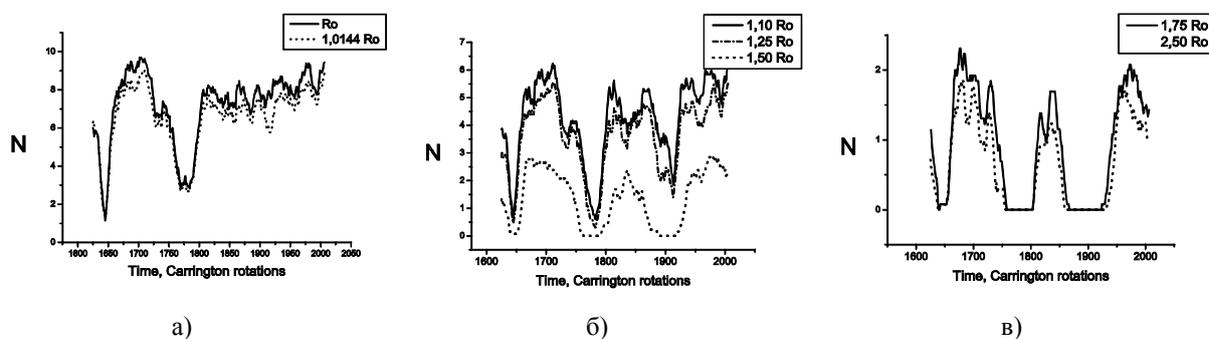


Рис. 7. Сглаженное скользящим средним по 13 последовательным оборотам число +/- секторных границ в N-полусфере на высотах от R_{\odot} до $2.5 R_{\odot}$

Напомним, что минимумы солнечной активности между 20–21, 21–22 и 22–23 циклами приходятся на 1976, 1986 и 1996 годы. Максимумы трех циклов наблюдались в 1980, 1990 и 2000 годах.

Обратим внимание на кривые рис. 7, относящиеся к высотам $1-1.0144 R_{\odot}$. Максимальное число секторных границ, а следовательно и наиболее сложная структура магнитного поля, наблюдалась на этих высотах в максимуме 21 цикла, вблизи 1978–1980 гг. В среднем в каждом обороте на уровне фотосферы наблюдалось около 9 границ каждого вида. Максимумы 22-го и 23-го циклов по числу границ были ниже максимума 21-го цикла. В минимуме между 21 и 22

циклами число границ уменьшилось до трех. В следующем минимуме такого резкого уменьшения числа границ на уровне фотосферы и на высотах до $0.144 R_{\odot}$ не наблюдается.

Уменьшение числа границ с ростом высоты заметно уже на расстояниях $1.0036 R_{\odot}$ и $1.014 R_{\odot}$. С переходом на большие высоты (рис. 7б, 7в) число секторов постепенно уменьшается, и более четко выявляются минимумы вблизи 1986 и 1996 годов. На высотах $1.75 R_{\odot}$ и выше в периоды минимума активности сектора вообще исчезают. Магнитное поле Солнца практически становится дипольным. В максимумах активности секторная структура наблюдается на всех рассматриваемых высотах. На высотах больше $1.75 R_{\odot}$ в 22 цикле это чаще всего двухсекторная структура, а в 21 и 23 циклах четырехсекторные структуры – частое явление.

5.2 Скорости вращения границ секторов

Как видно из рис. 6, границы секторов выстраиваются в цепочки, длина которых соответствует времени существования границы. По наклону цепочек можно определить скорость вращения каждой из них. Синоптические карты строятся для кэррингтоновского оборота 27.275 суток. Для границ, вращающихся с этим периодом, долгота не будет меняться со временем. При более быстром, чем кэррингтоновское, вращении границ в каждом последующем обороте они будут на большей долготе. При более медленном, чем кэррингтоновское, вращении долгота границы уменьшается со временем.

Мы отобрали границы, существовавшие более пяти оборотов Солнца, и разбили их на три группы по периоду вращения: $T = T_C$, $T > T_C$ и $T < T_C$. Здесь T_C – кэррингтоновский период вращения Солнца, равный 27.275 суток. На рис. 8 в среднем для трех циклов приведены изменения с высотой числа границ, вращающихся с периодом $T < T_C$, и средняя кривая для $T = T_C$ и $T > T_C$. Число границ каждого вида на уровне фотосферы принято за 1. Высоты даны в логарифмической шкале.

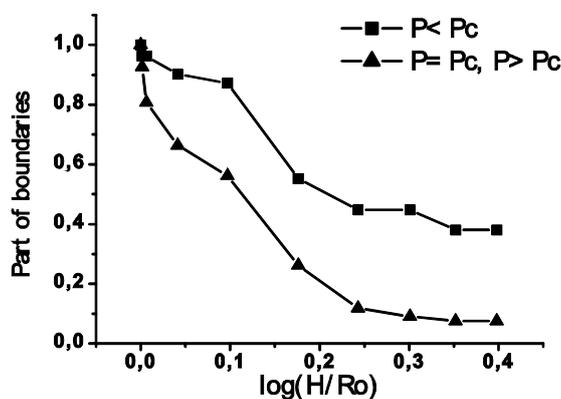


Рис. 8. Изменения с высотой числа границ, вращающихся с периодом $T < T_C$ (квадраты), и периодами $T = T_C$ и $T > T_C$ (треугольники). Число границ каждого вида на уровне фотосферы принято за 1. Высоты даны в логарифмической шкале

Как видим, границы, вращающиеся с периодом $T < T_C$, простираются до больших высот. Это подтверждает вывод, сделанный нами в предыдущей работе (Файнштейн и др., 2011), о наличии двух типов границ, отличающихся по скорости вращения, высотам распространения и связи с активными образованиями. Как было показано в работе Файнштейна и др. (2011),

Высотная стратификация солнечных магнитных полей...

медленно вращающиеся и достигающие небольших высот границы определяются активными областями. Границы, вращающиеся с периодами $T < T_C$ и распространяющиеся до больших высот, образуются крупномасштабными структурами слабого магнитного поля.

6 Заключение

Анализ пространственного распределения структур магнитного поля и процесса переполусовки позволил получить следующие результаты. С ростом высоты площадь положительного магнитного поля S_{+field} в 10-градусных по широте зонах стремится к 100 % (0 %) в окрестности минимума солнечной активности. На $H = 2.5 R_{\odot}$ эти значения положительного поля наблюдаются в течение ≈ 55 , 45 и 12 КО в окрестности минимумов между 22 и 23 циклами (100 %), 21 и 22 циклами (0 %) и между 20 и 21 циклами (100 %).

- В минимумах солнечной активности и в прилегающих периодах спада и роста активности граница полярного магнитного поля приближается к экватору с ростом высоты.
- Длительность периода, когда полярные поля сохраняют один знак, составляет 100–120 оборотов (7–9 лет).
- Периоды переполусовок, когда знак поля в полярных областях меняется от оборота к обороту, делятся 20–40 оборотов (1.5–3 года). В это время бывают интервалы времени, когда поле на обоих полюсах приблизительно одинаковое.
- Изменение площади в окрестности полюса, занимаемой преимущественной полярностью поля, существовавшей здесь до начала переполусовки, в процессе переполусовки происходит не монотонно. Эта площадь может уменьшиться до маленьких значений, а затем, в течение от нескольких кэррингтоновских оборотов до нескольких десятков оборотов, она возрастает вновь до больших значений, и лишь спустя некоторое время в полярной области надолго устанавливается поле нового знака. В максимумах 21 и 22 циклов на больших высотах можно говорить о трехкратной переполусовке.
- На высоте $H = R_{\odot}$ процесс переполусовки в полярной области в обеих полусферах начинается раньше в широтных зонах, расположенных ближе к экватору.
- Переполусовка заканчивается на 6–16 кэррингтоновских периодов вращения Солнца раньше на больших высотах по сравнению с малыми высотами.
- Наиболее сложная секторная структура магнитного поля наблюдалась в максимуме 21 цикла. В среднем в каждом обороте на уровне фотосферы наблюдалось около 9 границ каждого вида (+/- и -/+). В минимуме 21–22 циклов число границ уменьшилось до четырех. В следующем минимуме уменьшения числа границ на уровне фотосферы практически не наблюдалось.
- Уменьшение числа границ с ростом высоты заметно уже на расстояниях $1.0036 R_{\odot}$ и $1.014 R_{\odot}$. На высотах $1.75 R_{\odot}$ и выше в периоды минимума активности преобладает дипольная компонента магнитного поля Солнца. В максимумах активности на высотах больше $1.75 R_{\odot}$ в 22 цикле чаще всего наблюдается двухсекторная структура, а в 21 и 23 циклах четырехсекторные структуры – частое явление.
- Границы, для которых период вращения $T < T_C$, простираются выше, чем те, для которых $T \geq T_C$. Здесь T_C – кэррингтоновский период вращения Солнца.

Особый интерес, как нам представляется, вызывают полученные результаты, касающиеся переполусовки полярного магнитного поля. Оказалось, что процесс переполусовки поля является более сложным, чем это вытекает из существующих моделей изменения знака полярного поля на Солнце (см. ссылки во Введении). Превалирующий до начала

переполусовки знак полярного поля охватывает в течение переполусовки все меньшую площадь в окрестности полюса, но эта площадь уменьшается немонотонно. После начала переполусовки эта площадь может уменьшиться до нуля, но затем в окрестности полюса вновь появляются участки с предыдущей полярностью поля, которые существуют довольно много времени: от нескольких до более десяти кэррингтоновских оборотов. И лишь спустя определенное время в окрестности полюса устанавливается новая полярность поля. В предельном случае можно говорить о трехкратной переполусовке. Причем характер переполусовки заметно меняется с высотой. Наиболее ярко это проявляется в различии времени завершения изменения знака полярного поля на $H = R_{\odot}$ и $H = 2.5 R_{\odot}$: на поверхности источника переполусовка заканчивается раньше, чем на поверхности Солнца. Особенности переполусовки заметно различаются в максимумах разных циклов. Наши результаты стимулируют проведение более тщательного анализа процесса переполусовки в 20–23 циклах по данным измерений фотосферного поля, в том числе по данным инструментов с высоким пространственным разрешением. Несомненный интерес представляет сравнение полученных результатов, касающихся процесса переполусовки в максимуме 23 цикла с измерениями магнитного поля в солнечном ветре космическим аппаратом *Ulysses* при его прохождении в сентябре – декабре 2000 г. над южным полюсом Солнца и в сентябре 2001 г. над северным полюсом.

Работа авторов из ИСЗФ частично поддержана ГК 14.518.11.7047 и Соглашением 8407 Минобрнауки России.

Литература

- Альтшулер и др. (Altschuler M.D., Levine R.H., Stix M., and Harvey J.) // *Solar Phys.* 1977. V. 51. P. 345.
- Беневоленская Е.Е., Макаров В.И. // *Письма в Астрон. журн.* 1992. Т. 18. С. 266.
- Бэбкок (Babcock H.D.) // *Astrophys. J.* 1959. V. 130. P. 364.
- Бэбкок (Babcock H.W.) // *Astrophys. J.* 1961. V. 133. P. 572.
- Ванг и др. (Wang Y.-M., Nash A.G., Sheeley N.R., Jr.) // *Astrophys. J.* 1989. Part 1. V. 347. P. 529.
- Ванг и Шили (Wang Y.-M. and Sheeley N.R.) // *Astrophys. J.* 1992. V. 392. P. 310.
- Вейс и Томпсон (Weiss N.O., Thompson M.J.) // *Space Sci. Ser. of ISSI.* 2009. V. 32. P. 53.
- Дюррант и др. (Durrant C.J., Turner J.P.R., Wilson P.R.) // *Solar Phys.* 2004. V. 222. P. 345.
- Еселевич и др. (Eselevich V.G., Kaigorodov A.P., Fainshtein V.G.) // *Planetary and Space Sci.* 1990. V. 38. P. 459.
- Лабонт и Говард (Labonte B.J., Howard R.) // *Solar Phys.* 1982. V. 80. P. 361.
- Лейтон (Leighton R.B.) // *Astrophys. J.* 1964. V. 140. P. 1547.
- Макаров и Сивараман (Makarov V.I., Sivaraman K.R.) // *Solar Phys.* 1989. V. 119. P. 35.
- Мюррей и Вилсон (Murray N., Wilson P.R.) // *Solar Phys.* 1992. V. 142. P. 221.
- Нанди и Дибанду (Nandy, Dibyendu) // *First Asia-Pacific Solar Physics Meeting ASI Conference Series.* / Ed. Arnab Rai Choudhuri and Dipankar Banerjee. 2011. V. 2. P. 91.
- Руденко (Rudenko G.V.) // *Solar Phys.* 2001. V. 198. P. 5.
- Соланки и др. (Solanki S.K., Lagg A.) // *Meeting abstract from the CDRUM. 36th COSPAR Scientific Assembly held on 16–23 July 2006 in Beijing, China. 2006. #916.*
- Топка и др. (Топка К., Moore R., Labonte B.J., Howard R.) // *Solar Phys.* 1982. V. 79. P. 231.
- Файнштейн В.Г., Степанян Н.Н., Руденко Г.В., Ахтемов З.С., Силакова Е.В. // *Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв.* 2011. Т. 107. № 1. С. 74.
- Хоексема (Hoeksema J.T.) // *Structure and evolution of the large-scale solar and heliospheric magnetic fields.* Ph. D. Diss. Stanford Univ. 1984.
- Шатен и др. (Schatten K.H., Wilcox J.M., Ness N.F.) // *Solar Phys.* 1969. V. 6. P. 442.

Высотная стратификация солнечных магнитных полей...

Шелтинг и Обридко (Shelting B.D., Obridko V.N.) // Сборник трудов конференции «Солнце в эпоху смены знака магнитного поля». ГАО РАН, Пулковое, Санкт-Петербург. 28 мая – 1 июня 2001. С. 391.