

УДК 523.94

Исследование крупномасштабных магнитных полей Солнца

О.А. Андреева

ФГБУН “Крымская астрофизическая обсерватория РАН”, Научный, Крым, 298409
olga@crao.crimea.ua

Поступила в редакцию 11 декабря 2015 г.

Аннотация. Происхождение и эволюция крупномасштабных магнитных полей является одной из ключевых проблем физики Солнца. Как показывают детальные исследования, суммарный вклад слабых магнитных полей в общее магнитное поле Солнца превышает 90 %. Изучение крупномасштабных магнитных полей важно не только для понимания их природы, причинно-следственных связей между солнечной активностью и свойствами магнитных полей. Оно имеет также важный прикладной аспект, поскольку крупномасштабные магнитные поля во многом определяют состояние межпланетной среды и тем самым играют важную роль в контексте солнечно-земных связей. В работе дается историческая справка об исследованиях, проведенных в этом направлении. Акцент сделан на работах крымских ученых, поскольку исследование слабых магнитных полей на Солнце — одно из направлений изучения солнечного магнетизма в Крымской астрофизической обсерватории на протяжении нескольких последних десятилетий.

RESEARCH OF LARGE-SCALE SOLAR MAGNETIC FIELDS AT CRAO, by *O.A. Andreeva*. The origin and evolution of large-scale magnetic fields is one of the key problems in solar physics. The detailed studies show that the total contribution of weak magnetic fields into the total magnetic field of the Sun is higher than 90 %. A study of large-scale magnetic fields is important not only for understanding their nature, cause and effect relationships between solar activity and properties of magnetic fields. Large-scale magnetic fields have also an important applied aspect, since the large-scale magnetic fields determine largely the state of the interplanetary medium, and thus play an important role in the context of solar-terrestrial relations. The paper gives a historical summary of the research carried out in this direction. The emphasis is made on investigations of the Crimean scientists, since the study of weak magnetic fields on the Sun is one of the branches in the study of solar magnetism at the Crimean Astrophysical Observatory in the last few decades.

Ключевые слова: Солнце, крупномасштабные магнитные поля

1 Введение

Генерация и эволюция магнитных полей — одна из главных проблем современных исследований Солнца. Генерация магнитного поля описывается теориями динамо, основополагающие идеи которых были заложены более полувека назад Паркером (1955). В настоящее время преобладает точка зрения, что глобальное магнитное поле в периоды минимума активности описывается полоидальным дипольным полем. С началом солнечного цикла это поле растягивается и усиливается широтным дифференциальным вращением и радиальным градиентом угловой

скорости в конвективной зоне, образуя тороидальное магнитное поле, которое при достижении определенной напряженности всплывает на поверхность в виде биполярных активных областей. Затем магнитное поле хвостовой полярности за счет турбулентной диффузии и меридиональной циркуляции переносится в полярные области и по мере накопления приводит к изменению знака полярности дипольного поля. Меридиональная циркуляция переносит это поле к основанию конвективной зоны, где оно усиливается спиральной конвекцией, образуя новое тороидальное поле противоположной полярности. В современных динамо-теориях до сих пор спорным остается вопрос о природе слабых магнитных полей и их роли в цикличности Солнца.

Магнитные поля на Солнце, измеряемые с низким пространственным (угловым) разрешением или полученные усреднением наблюдений с высоким разрешением, называются крупномасштабными (КМП).

Исторически сложилось так, что сильные локальные поля длительное время считались самым главным и основным проявлением солнечной активности, формирующим во времени последовательность активных циклов. Позже появились исследования, в которых было показано, что КМП являются самостоятельным явлением солнечного магнетизма и указывают на ряд интересных особенностей солнечной цикличности. Некоторые долгоживущие квазистационарные процессы на Солнце, связанные с циклом активности, захватывают большую часть или даже всю его поверхность. Это относится к системам зональных границ, корональным дырам (КД). Форма солнечной короны изменяется в ходе цикла, отражая эволюцию полей самого большого масштаба. Структура межпланетного магнитного поля (ММП) и формирование высокоскоростных потоков солнечного ветра определяется КМП. Солнечные КМП оказывают определяющее влияние на характер крупномасштабной структуры ММП, тем самым воздействуя на «космическую погоду». Поэтому так важны комплексные исследования вариаций КМП на Солнце и в гелиосфере.

Многолетние исследования поверхностного (фотосферного) магнитного поля показали, что оно представляет своеобразный конгломерат магнитных полей разнообразных масштабов и амплитуд, пространственно-временные характеристики которых колеблются в широком диапазоне. Пространственные и структурные неоднородности создаются различием эволюционных и энергетических характеристик магнитных полей различных масштабов. Различают несколько типов крупномасштабных магнитных полей. Фоновые магнитные поля, магнитное поле Солнца как звезды или общее магнитное поле (ОМП) и ММП. Согласно современным представлениям, существующее (наблюдаемое) в межпланетном пространстве магнитное поле является результатом взаимодействия плазмы солнечного ветра с магнитными структурами, укорененными на Солнце. Когда говорят о фоновом поле, имеют в виду магнитные структуры размером меньше радиуса Солнца, если о глобальном магнитном поле Солнца – структуры размером больше радиуса Солнца. Для исследований КМП не требуются наблюдения с высоким пространственным разрешением, но зато необходима высокая чувствительность измерений, поскольку напряженность КМП достаточно слабая.

В настоящее время существуют различные гипотезы возникновения крупномасштабного поля. Согласно гипотезе Бэбкока-Лейтона, наблюдаемое крупномасштабное поле формируется в результате распада и поверхностного перераспределения магнитных полей активных областей вследствие диффузии и меридиональной циркуляции. Другой подход к происхождению поверхностного крупномасштабного магнитного поля основывается на предположении, что оно отражает крупномасштабное поле внутри конвективной зоны. Возможности современных солнечных наблюдений позволяют непосредственно проследить сложное поведение крупномасштабных структур.

2 Историческая справка

На современном этапе уже имеются достаточные базы данных о КМП на Солнце и в гелиосфере. Это магнитографические наблюдения солнечных магнитных полей с низким разрешением, наблюдения ОМП, синоптические H_α -карты фонового поля, ряды полярности гелиосферного магнитного поля на орбите Земли. Магнитографические наблюдения слабых фотосферных (фоновых) полей с целью построения синоптических карт магнитного поля выполняются в нескольких обсерваториях: Маунт-Вилсон (с 1959 г.), Стэнфорд (с 1975 г.), Китт-Пик (с 1976 г.), в Саянской обсерватории Института солнечно-земной физики (СО ИСЗФ; с 1978 г.). В 1968 г. в Крымской астрофизической обсерватории (КрАО) по инициативе А.Б. Северного начались измерения магнитных полей Солнца с использованием параллельного пучка света от всего видимого диска Солнца – магнитного поля Солнца как звезды или ОМП Солнца. Позже такие наблюдательные программы выполнялись в разное время в четырех обсерваториях: КрАО, Национальной солнечной обсерватории (НСО, США), Солнечной обсерватории им. Дж. Уилкокса (СОУ, США), СО ИСЗФ (Россия). Сейчас регулярные наблюдения ОМП Солнца проводятся в Стэнфордской обсерватории и в КрАО.

Начало магнитных исследований Солнца было положено в 1908 г. Дж. Хэйлом в обсерватории Маунт-Вилсон (Хэйл, 1908). Он обнаружил расщепление спектральных линий в тени солнечных пятен и впервые объяснил его незадолго до этого открытым в лабораторных условиях эффектом Зеемана. Однако предпринятые Хэйлом попытки обнаружить магнитные поля вне пятен привели к противоречивым результатам. Для измерения слабых фоновых (т. е. расположенных вне активных областей) магнитных полей точность использованного фотографического метода оказалась тогда явно недостаточной. Лишь спустя несколько десятилетий в той же обсерватории Бэбкоками (Бэбкок, Бэбкок, 1952; Бэбкок, 1953) был создан фотоэлектрический магнитограф, многократно возросшая точность измерений на котором позволила наблюдать магнитные поля уже по всему диску Солнца.

История исследования КМП была начата Бэбкоком и Северным. О работах Северного будет сказано в следующем разделе. Распределения магнитного поля по поверхности Солнца изучали Г.В. Бэбкок и Г.Д. Бэбкок (1955). Г.В. Бэбкок высказал предположение о связи магнитных полей активных областей с ОМП Солнца (1961). В дальнейшем крупномасштабные солнечные магнитные поля подробно рассматривали В. Бумба и Р. Говард (1965), наблюдая их с помощью магнитографа обсерватории Маунт-Вилсон (США, Калифорния). В результате исследования таких полей в 1967 г. был создан атлас фотосферных магнитных полей на всем диске Солнца по наблюдениям 1959–1966 гг. (Бумба, Смит, 1967). Подробный обзор результатов, полученных с помощью этого атласа, выполнен в (Бумба, Клечек, 1979). Различные аспекты исследований КМП на Солнце на протяжении более 50 лет (с 40-х по 90-е годы XX века) обобщены в (Гуртовенко, 1992). Знаковым событием в освещении научных результатов исследований эволюции КМП на Солнце на рубеже веков стала Международная конференция “Солнце в эпоху смены знака магнитного поля”, проведенная в Главной астрономической обсерватории РАН (Пулково, 2001). Комплексный обзор исследований КМП за полувековой период с указанием наиболее интересных результатов представлен в работе (Демидов, Григорьев, 2004). Позже исследование КМП было продолжено большим количеством авторов. В этой работе акцент сделан в основном на исследования, выполненные в КрАО.

3 Исследования КМП в КрАО в XX веке

Важный вклад в разработку и создание инструментальной основы исследований солнечных магнитных полей – солнечных магнитографов – внесли А.Б. Северный, Н.С. Никулин,

В.Е. Степанов. Ими в КрАО был создан первый в мире магнитограф полного вектора (Никулин и др., 1958).

В 60-х годах XX века по наблюдениям на двойном магнитографе в Крымской астрофизической обсерватории А.Б. Северный (Северный, 1964а, б, 1965, 1966, 1968, 1969, 1971) показал, что на Солнце нет когерентного общего магнитного поля. Оно складывается из мелких элементов разного размера, напряженности и знака. Лишь результаты значительного пространственного усреднения позволяют обнаружить в некоторых крупномасштабных структурах преобладание потока магнитного поля той или иной полярности. В подробном анализе наблюдений полярных и экваториальных зон Солнца А.Б. Северный исследовал различные крупномасштабные солнечные образования, характеризующиеся напряженностью магнитных полей от единиц гаусс в фоновых полях до тысяч гаусс в солнечных пятнах. В работах (Северный, 1964б, 1965) показано, что поле полярных областей Солнца отличается от поля типа диполя или равномерно намагниченной сферы. А.Б. Северный впервые отметил трудности в интерпретации фонового поля как рассеянного поля хвостовых частей активных областей.

Отдельно рассмотрим работы, непосредственно связанные с различиями характеристик слабых крупномасштабных и сильных магнитных полей (в активных областях) на Солнце. В работах (Котов и др., 1977; Котов, Степанян, 1980) показано, что образования со слабыми магнитными полями вносят определяющий вклад в ОМП Солнца. По полученным оценкам он может достигать до 90 %. В работах (Степанян, 1982, 1985) изучено распределение магнитных полей на Солнце на основе наблюдений в линии H_{α} по методу Мак-Интоша (Мак-Интош, Драйер, 1976). Результаты этих работ свидетельствуют о том, что слабые КМП на Солнце — самостоятельное явление, отражающее конвекцию третьего яруса, размеры элементов которой сравнимы с радиусом Солнца. Теоретические исследования (Бранденбург, 2005) могут объяснить такие результаты тем, что в недрах Солнца генерация сильных и слабых магнитных полей происходит на разных глубинах. Сильные поля формируются вблизи дна конвективной зоны, так как здесь создаются наиболее благоприятные условия для противодействия силе плавучести Паркера. Именно сильные магнитные поля (10^4 – 10^5 Гс) способны обеспечить выход магнитных трубок на поверхность в области королевских широт в соответствии с законом Джоя (Д'Сильва, 1993). Слабые магнитные поля образуются вблизи фотосферной поверхности, поскольку, согласно гелиосейсмологическим данным, именно в этой области конвективной зоны происходит смена знака градиента скорости осевого вращения по глубине, что обеспечивает распространение динамо-волн в направлении экватора на низких широтах (Попова, Соколов, 2010).

В сложной проблеме переменности магнитного поля Солнца особый интерес представляет дисбаланс (или так называемая асимметрия) магнитного поля, измеряемого на солнечной поверхности или в межпланетном пространстве. Явление дисбаланса фотосферного поля, заключающегося в перевесе одной полярности над другой в N- или S-полусферах или на всем видимом диске Солнца, впервые было отмечено А.Б. Северным (1968), а затем В.А. Котовым, В.И. Ханейчуком, Т.Т. Цапом. Авторы работ (Котов, Левицкий, 1985; Котов и др., 1999) показали, что нарушение баланса магнитных полей N- и S-полярности является характерным свойством ОМП Солнца. В работе (Степанян, 1982) показано, что различие слабых магнитных полей Солнца N- и S-полярности не ограничивается ненулевой разностью потоков. Их динамические характеристики существенно изменяются во времени и пространстве. Изучение дисбаланса полей N- и S-полярности на Солнце важно потому, что именно эта разность потоков магнитного поля в значительной степени определяет состояние ММП и солнечно-земные связи.

4 Результаты исследований в КрАО КМП в 2005–2015 гг.

Измерения ОМП Солнца, начатые в КрАО на БСТ-1 в 1968 г., почти непрерывно ведутся в течение 48 лет. В ряде работ (Котов, 2012, 2013; Котов и др., 2012; Ханейчук и др., 2014; Котов,

2015; Котов, Ханейчук, 2015а) прямыми измерениями ОМП была подтверждена секторная структура фотосферного поля, наиболее точно определена скорость экваториального вращения Солнца, обнаружена связь переменности ОМП с 11(22)-летним циклом активности. Впервые составлен каталог ОМП, обнаружено явление аномального вращения Солнца как звезды. Наиболее интересный результат исследований 2015 года: о резком переходе Солнца в 2014 г. из состояния с преимущественно отрицательным полем в состояние с доминированием поля положительной полярности (Котов, Ханейчук, 2015б).

Исследование эволюции и характеристик КМП, их связи с активными образованиями на Солнце – по-прежнему одно из наиболее актуальных направлений исследования солнечного магнетизма в Крымской астрофизической обсерватории. За последние годы в Лаборатории физики Солнца проведено два крупных цикла работ, касающихся исследования КМП Солнца.

4.1 Цикл 1 (2005–2010 гг.)

Исследование слабых магнитных полей и их дисбаланса продолжено в работах Н.Н. Степанян, О.А. Андреевой и Я.И. Зелька (Степанян и др., 2009; Степанян и Андреева, 2005; Андреева, Степанян, 2008; Андреева и др., 2008; Зельк, 2008; Зельк и др., 2008, 2009а, б, 2010) на основе синоптических карт магнитных полей Солнца, полученных в обсерватории NSO/Kitt Peak (США).

1. Изучены особенности эволюции КМП Солнца разной напряженности (Степанян, Андреева, 2005; Андреева, Степанян, 2008). Выделено две группы магнитных полей, отличающихся по длине цикла и соотношению магнитных потоков N- и S-полярности в северном и южном полушариях. Первая группа (3–10 Гс) – высокая корреляция между полями разного знака в противоположных полусферах и отсутствие 11-летнего цикла. Во второй группе (≥ 15 Гс) с ростом напряженности растет корреляция между одноименными полями в разных полусферах и все четче проявляется 11-летний цикл.
2. В работах (Андреева и др., 2008; Зельк и др., 2008) по данным наблюдений фоновых магнитных полей на временном интервале 26 лет, на основе анализа спектральной плотности мощности по соответствующим временным рядам в пятиградусных широтных зонах в диапазоне напряженности магнитного поля [0; 200] Гс, авторами определены характеристики вращения структур КМП. В результате анализа спектров получено: структуры, вращающиеся с одним и тем же значимым периодом, наблюдаются в широком диапазоне широт; в спектре мощности для одной и той же широты существует несколько значимых периодов.
3. В (Андреева и др., 2010) рассмотрены широтные распределения скорости роста магнитных потоков разной напряженности и их эволюция в течение трех солнечных циклов. Полученные данные сопоставлены с широтными распределениями относительных чисел и площадей солнечных пятен. Анализ роста магнитных потоков с напряженностью 5–200 Гс на широтах 0–70° в обеих полусферах, а также относительных чисел и площадей солнечных пятен, позволил сформулировать **единую картину развития солнечных циклов слабых и сильных магнитных полей**: “Новый солнечный цикл начинается с роста слабых магнитных полей напряженностью 5–200 Гс на широтах 20°–25° в обеих полусферах. Происходит это за год до минимума активности, определяемого по пятнам. Через 2 года скорость роста суммарного магнитного потока достигает максимума. После этого максимальный рост потоков распространяется к полюсам и экватору, совпадая с началом роста сильных магнитных полей солнечных пятен на соответствующих широтах. Затем рост скорости постепенно прекращается, и потоки начинают убывать”.

4.2 Цикл 2 (2011–2015 гг.)

Только в самые последние годы эволюцию КМП стали изучать в широком диапазоне высот солнечной атмосферы. Пионерами таких исследований стала КрАО в тесном сотрудничестве с коллегами из ИСЗФ (Иркутск). В работах использовались те же исходные данные по магнитным полям, но по ним были проведены расчеты магнитного поля от фотосферы до поверхности источника.

1. **Исследование крупномасштабных структур магнитного поля Солнца. Их высотное распределение и эволюция.** Был определен набор характеристик крупномасштабного поля, существенных для сопоставления с активными и спокойными образованиями на Солнце. В частности, обнаружено два типа секторных границ, определены их высотные и эволюционные характеристики. Подробно исследован процесс переполюсовок полярных магнитных полей в трех солнечных циклах. В исследованиях сделан упор на определение количественных оценок размеров структур, изменения характеристик с высотой, на процесс переполюсовок полярного магнитного поля на разных высотах (Файнштейн и др., 2011; Ахтемов и др., 2013; Степанян и др., 2013; Ахтемов и др., 2015а). В работе (Андреева и др., 2015) определено широтное и высотное распределения суммарного магнитного потока Солнца. Найдены скорости его изменения со временем. Это позволило прийти к выводу о наличии периодической составляющей изменения скорости суммарного магнитного потока в эпохи максимума активности на широтах от -20° до $+20^\circ$. Проведенный в (Ахтемов и др., 2015б) анализ распределения униполярных структур КМП Солнца по широте $[-40^\circ; 40^\circ]$, по долготе от $[0^\circ; 360^\circ]$ и высоте от 1 до $1.15 R_\odot$ свидетельствует о сложном строении КМП. В зоне пятнообразования присутствуют структуры, различающиеся по своей природе.
2. **Связь активных образований, волокон, протуберанцев, КД, активных областей с рентгеновскими вспышками со структурами спокойного магнитного поля Солнца.** В работах (Перебейнос и др., 2011; Малащук и др., 2011; Штерцер и др., 2012; Ахтемов, 2014; Барановский и др., 2015) изучалась связь солнечных образований с КМП на разных высотах. Было исследовано положение волокон относительно границ крупномасштабных структур магнитного поля. Также найдена связь волокон и КД с переполюсовкой полярных полей. Для переполюсовок в циклах с 19 по 23 общим является наличие интервалов от 5 до 20 кэррингтоновских оборотов, в которых отсутствуют полярные КД. Новым является результат о приближении низкоширотных границ КД к полюсу перед переполюсовкой полярных полей.
3. **Исследование магнитоизолированных комплексов.** Впервые в 2011 г. В.М. Малащук и Н.Н. Степанян (Малащук и др., 2011) обнаружили на изображениях Солнца в линии He I 1083 нм структуры, соизмеримые по размеру с радиусом Солнца. Они могут содержать практически любые из известных солнечных образований (группы пятен, флоккулы, волокна, КД, области, промежуточные по яркости между КД и невозмущенной хромосферой, спокойные области). Граница такой структуры четко прослеживается. Наложение на изображение в гелии карты измерения магнитного поля и расчетов силовых линий для начальных точек, расположенных внутри такой структуры, показало, что ее граница совпадает с нулевой линией магнитного поля, а силовые линии только в 20 % случаев пересекают эту границу. Авторы назвали такие структуры “магнитоизолированными комплексами”. Подсчет корональных арок, пересекающих границу и расположенных полностью внутри комплекса, показал, что пересекают границу лишь 20 % от суммы арок обоих типов (Малащук и др., 2011,

2012; Файнштейн и др., 2013; Малащук, Степанян, 2013). Анализ магнитоизолированных комплексов 24-го цикла активности по изображениям Солнца в линии Fe IX–X 17.1 нм показал, что более 80 % арочных структур не пересекают границ комплексов, что подтверждает их магнитоизолированность. Внутри комплексов большого размера иногда наблюдаются небольшие комплексы, магнитоизолированные от внешнего большого комплекса. Время существования комплексов часто более двух кэррингтоновских оборотов Солнца (Малащук, Степанян, 2015).

Результаты, полученные в ходе исследования КМП, могут быть использованы при фундаментальных исследованиях Солнца и создании физических основ прогноза солнечной активности.

5 Заключение

Несмотря на значительный прогресс в исследованиях КМП и полученные важные результаты, многие проблемы еще далеки от своего окончательного решения. Исследования КМП, проведенные в Лаборатории физики Солнца КРАО, за последние годы приблизили нас к решению одной из спорных проблем физики Солнца – происхождению КМП и его связи с активными образованиями. Детальное исследование показало, что КМП – самостоятельное проявление солнечного магнетизма, т. е. на Солнце присутствует два типа полей: крупномасштабные магнитные поля малой напряженности и поля активных областей большой напряженности. Существенным фактом для уточнения этого решения, помимо дальнейших наблюдений и моделирования результатов наблюдений, было бы определение параметров магнитных полей в солнечных недрах. Возможно, все возрастающая точность гелиосейсмологических методов в скором времени позволит сделать это.

Литература

- Андреева, Степанян (Andreyeva O.A., Stepanian N.N.). // *Astron. Nachr.* 2008. V. 329. N. 6. P. 579.
- Андреева О.А., Зельк Я.И., Степанян Н.Н. // *Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв.* 2008. V. 104. № 1. С. 5.
- Андреева О.А., Зельк Я.И., Степанян Н.Н., Цап Ю.Т. // *Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв.* 2010. Т. 106. № 1. С. 17.
- Андреева О.А., Руденко Г.В., Степанян Н.Н., Файнштейн В.Г. // *Международная конференция “Физика Солнца: теория и наблюдения”*. Тез. докл. Научный – Симферополь. Антикава. 2015. С. 13.
- Ахтемов З.С. // *Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв.* 2014. Т. 110. № 1. С. 77.
- Ахтемов З.С., Андреева О.А., Руденко Г.В., Степанян Н.Н., Файнштейн В.Г. // *Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв.* 2013. Т. 109. № 3. С. 17.
- Ахтемов и др. (Akhtemov Z.S., Andreyeva O.A., Rudenko G.V., Stepanian N.N., Fainshtein V.G.) // *Adv. Space Res.* 2015a. V. 55. Issue 3. P. 968.
- Ахтемов З.С., Степанян Н.Н., Файнштейн В.Г., Руденко Г.В. // *Международная конференция “Физика Солнца: теория и наблюдения”*. Тез. докл. Научный – Симферополь. Антикава. 2015б. С. 16.
- Барановский Э.А., Тарашук В.П., Степанян Н.Н., Штерцер Н.И. // *Международная конференция “Физика Солнца: теория и наблюдения”*. Тез. докл. Научный – Симферополь. Антикава. 2015. С. 20.
- Бранденбург (Brandenburg A.) // *Astrophys. J.* 2005. V. 625. P. 539.

- Бумба, Говард (Bumba V., Howard R.) // *Astrophys. J.* 1965. V. 141. P. 1502.
- Бумба, Смит (Bumba H.V., Smith S.F.) // *Carnegie Instit. Publ. Wash.* 1967. V. 626. P. 14.
- Бумба В., Клечек И. // *Проблемы солнечной активности.* М.: Мир. 1979.
- Бэбкок, Бэбкок (Babcock H.W., Babcock H.D.) // *Publ. Astron. Soc. Pacific.* 1952. V. 64. P. 282.
- Бэбкок (Babcock H.W.) // *Astrophys. J.* 1953. V. 118. P. 387.
- Бэбкок, Бэбкок (Babcock H.D., Babcock H.W.) // *Astrophys. J.* 1955. V. 121. P. 349.
- Бэбкок (Babcock H.W.) // *Astrophys. J.* 1961. V. 133. P. 572.
- Гуртовенко Э.А. // *Вариации глобальных характеристик Солнца.* Киев: Наук. думка. 1992.
- Демидов М.Л., Григорьев В.М. // *Солнечно-земная физика.* 2004. Т. 6. С. 10.
- Д'Сильва (D'Silva S.) // *Astron. Astrophys.* 1993. V. 272. N. 2. P. 621.
- Зельк Я.И., Степанян Н.Н., Андреева О.А. // *Проблемы управления и информатики.* 2008. № 6. С. 116.
- Зельк (Zuelyk Ya.I.) // *Proceedings of the 2nd International Conference on Inductive Modelling (ICIM-2008).* Kyiv. 2008. P. 267.
- Зельк Я.И., Степанян Н.Н., Андреева О.А. // *Управляющие системы и машины.* 2009а. № 3. С. 30.
- Зельк Я.И., Степанян Н.Н., Андреева О.А. // *Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв.* 2009б. Т. 105. № 1. С. 18.
- Зельк Я.И., Степанян Н.Н., Андреева О.А. // *Международный научно-технический журнал "Проблемы управления и информатики".* 2010. № 2. С. 144.
- Котов В.А., Степанян Н.Н., Щербакова З.А. // *Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв.* 1977. Т. 56. С. 75.
- Котов В.А., Степанян Н.Н. // *Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв.* 1980. Т. 62. С. 117.
- Котов В.А., Левицкий Л.С. // *Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв.* 1985. V. 71. С. 32.
- Котов В.А., Ханейчук В.И., Цап Т.Т. // *Астрон. журн.* 1999. Т. 87. Вып. 3. С. 218.
- Котов В.А. // *Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв.* 2012. Т. 108. № 1. С. 35.
- Котов В.А. // *Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв.* 2013. Т. 109. № 3. С. 186.
- Котов В.А., Саншез Ф.М., Бизуар К. // *Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв.* 2012. Т. 108. № 1. С. 57.
- Котов (Kotov V.A.) // *Adv. Space Res.* 2015. V. 55. N. 3. P. 979.
- Котов В.А., Ханейчук В.И. // *Международная конференция "Физика Солнца: теория и наблюдения". Тез. докл. Научный – Симферополь. Антиква.* 2015а. С. 56.
- Котов В.А., Ханейчук В.И. // *Международная конференция "Физика Солнца: теория и наблюдения". Тез. докл. Научный – Симферополь. Антиква.* 2015б. С. 57.
- Малашук В.М., Руденко Г.В., Степанян Н.Н., Файнштейн В.Г. // *Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв.* 2011. Т. 107. № 1. С. 89.
- Малашук В.М., Файнштейн В.Г., Степанян Н.Н., Руденко Г.В., Егоров Я.И. // *Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв.* 2012. Т. 108. № 1. С. 105.
- Малашук В.М., Степанян Н.Н. // *Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв.* 2013. Т. 109. № 1. С. 148.
- Малашук В.М., Степанян Н.Н. // *Международная конференция "Физика Солнца: теория и наблюдения". Тез. докл. Научный – Симферополь. Антиква.* 2015. С. 60.
- Мак-Интош П., Драйер М. // *Наблюдения и прогноз солнечной активности.* М.: Мир. 1976. С. 352.
- Международная конференция "Солнце в эпоху смены знака магнитного поля" // *Программа и тез. докл. ГАО РАН. Пулково. Санкт-Петербург. 28 мая – 1 июня 2001 г. С.-П.: Изд-во ГАО РАН.* 2001. С. 113.
- Никулин Н.С., Северный А.Б., Степанов В.Е. // *Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв.* 1958. Т. 19. С. 3.
- Паркер (Parker E.N.) // *Astrophys. J.* 1955. V. 122. P. 293.

- Перебейнос В.А., Степанян Н.Н., Файнштейн В.Г., Руденко Г.В. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 2011. Т. 107. № 1. С. 64.
- Попова, Соколов (Popova E.P., Sokoloff D.D.) // Astron. Rep. 2010. V. 54. N. 11. P. 1042.
- Северный (Severny A.) // Space Sci. Rev. 1964a. V. 3. P. 451.
- Северный (Severny A.) // XII General Assembly IAU. Hamburg. Aug. 26. 1964b. P. 755.
- Северный А.Б. // Астрон. журн. 1965. V. 42. № 2. С. 217.
- Северный А.Б. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 1966. Т. 35. С. 97.
- Северный А.Б. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 1968. Т. 38. С. 3.
- Северный (Severny A.) // Nature. 1969. V. 224. N. 5214. P. 53.
- Северный (Severny A.) // Quart. J. Roy. Astron. Soc. 1971. V. 12. N. 4. P. 363.
- Степанян Н.Н. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 1982. Т. 65. С. 43.
- Степанян Н.Н. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 1985. Т. 71. С. 62.
- Степанян Н.Н., Андреева О.А. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 2005. Т. 101. С. 120.
- Степанян Н.Н., Андреева О.А., Зельк Я.И. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 2009. Т. 105. № 1. С. 5.
- Степанян и др. (Stepanyan N.N., Akhtemov Z.S., Fainshtein V.G., Rudenko G.V.) // Geomagnetism and Aeronomy. 2013. V. 53. N. 8. P. 957.
- Файнштейн В.Г., Степанян Н.Н., Ахтемов З.С. и др. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 2011. Т. 107. № 1. С. 74.
- Файнштейн В.Г., Малащук В.М., Степанян Н.Н. и др. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 2013. Т. 109. № 1. С. 156.
- Ханейчук В.И., Котов В.А., Цап Ю.Т. // Труды конференции “Солнечная и солнечно-земная физика”. С.-Пб: ГАО РАН. 2014. С. 443.
- Хэйл (Hale G.E.) // Astrophys. J. 1908. V. 28. P. 315.
- Штерцер Н.И., Степанян Н.Н., Руденко Г.В., Файнштейн В.Г. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 2012. Т. 108. № 1. С. 278.