

УДК 523.9-327

## Эволюция дисбаланса магнитных полей на Солнце

*Н.Н. Степанян<sup>1</sup>, О.А. Андреева<sup>1</sup>, Я.И. Зелык<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> НИИ “Крымская астрофизическая обсерватория”, 98409, Украина, Крым, Научный  
*nataly@crao.crimea.ua, olga@crao.crimea.ua*

<sup>2</sup> Институт космических исследований НАНУ-НКАУ, просп. ак. Глушкова, 40, Киев-187, 03680, Украина  
*adapt@space.is.kiev.ua*

Поступила в редакцию 25 ноября 2008 г.

**Аннотация.** Определено изменение, со временем и широтой, потока и вращения структур дисбаланса магнитных полей разной напряженности по наблюдениям обсерватории Китт-Пик за 26 лет.

Выявленные в ходе работы закономерности позволяют объяснить это изменение следующим образом.

Структура дисбаланса магнитного поля определенной напряженности всплывает на поверхность фотосферы, обладая вращением, характерным для зоны образования этой структуры. После этого структура начинает дрейфовать вдоль меридиана (к полюсу или к экватору), вращаясь с той же скоростью и занимая некоторый интервал широт. Сместившись к полюсам от широты всплытия примерно на 20° (или более – в зависимости от периода вращения), структуры с некоторым значимым периодом перестают существовать как единое целое, уступая место другим структурам с иными значимыми периодами вращения.

Отсюда следует, что дифференциальное вращение слоев, ответственных за образование структур дисбаланса полей разной напряженности, можно определить по зависимости периода вращения от широты всплытия структур дисбаланса.

EVOLUTION OF MAGNETIC FIELDS IMBALANCE ON THE SUN, *by N.N. Stepanian, O.A. Andryeyeva, Ya.I. Zyelyk.* Changing with time and latitude of the flux and rotation of magnetic fields imbalance structures of different intensity from observations of the Kitt-Peak observatory for 26 years was defined.

The regularities revealed during the work, allow to explain this change as follows.

The structure of the magnetic field imbalance of certain strength emerges on the photosphere surface, having rotation, typical for the area of this structure formation. After that the structure begins to drift along a meridian (to the pole or to equator), rotating with the same velocity and occupying the some interval of latitudes. Displaced to poles from latitude of surfacing approximately by 20° (or more – depending from the rotation period), structures with some significant period cease to exist as a whole, giving the way to other structures with other significant rotation periods.

It follows that differential rotation of the layers responsible for formation of imbalance structures of fields of different intensity, it is possible to define as dependence of the rotation period from latitude of surfacing of imbalance structures.

**Ключевые слова:** Солнце, магнитные поля, дисбаланс

---

## 1 Введение

Детальное изучение распределения магнитных полей на поверхности Солнца стало возможным с изобретением магнитографа Бибкоками (Бибкок, 1955), а позднее двойного магнитографа в Крымской астрофизической обсерватории под руководством А.Б. Северного (Северный, 1966).

Исследование слабых магнитных полей на Солнце – одно из направлений изучения солнечного магнетизма в Крымской обсерватории на протяжении последних пятидесяти лет. Упомянем некоторые результаты, полученные в КрАО.

А.Б. Северный в работах семидесятых годов (1964, 1964а, 1965, 1966, 1968) показал, что на Солнце нет когерентного общего магнитного поля. Оно складывается из мелких элементов разного размера, напряженности и знака. Поле полярных областей Солнца отличается от поля типа диполя или равномерно намагниченной сферы. Позднее, в работе Котова и Левицкого (1985) показано, что нарушение баланса “+” и “–” магнитных полей является характерной чертой общего магнитного поля Солнца (ОМП). Перевес отрицательного поля над положительным отмечался во многих работах (Северный, 1968; Гопасюк, Цап, 1974; Котов и др., 1977, 1981, 1983, 1999).

Различие слабых магнитных полей Солнца “+” и “–” полярности не ограничивается ненулевой разностью потоков. Их динамические характеристики существенно меняются со временем и в пространстве (Степанян, 1982, 1985). Изучение дисбаланса “+” и “–” полей на Солнце важно еще и потому, что именно эта разность потоков магнитного поля определяет в значительной степени состояние межпланетного магнитного поля и всю солнечно-земную физику.

Исследование слабых магнитных полей и их дисбаланса было продолжено в работах Степанян, Андреевой и Зелыка 2005–2008 годов на основе синоптических карт магнитных полей обсерватории Кит Пик за 21–23 циклы солнечной активности (Степанян, Андреева, 2005; Андреева, Степанян, 2008; Андреева и др., 2008; Степанян и др., 2009; Зелык и др., 2008, 2009). Данная работа является их продолжением. В работе (Степанян и др., 2009) на материале наблюдений за 26 лет построены спектры мощности для пятиградусных широтных зон и четырех интервалов напряженности 0–200 Гс. В результате анализа спектров в среднем для всего 26-летнего периода 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. (Значимыми условимся называть периоды, мощность которых превышает  $3\sigma$ .)

Эти результаты иллюстрируются рисунком 1.

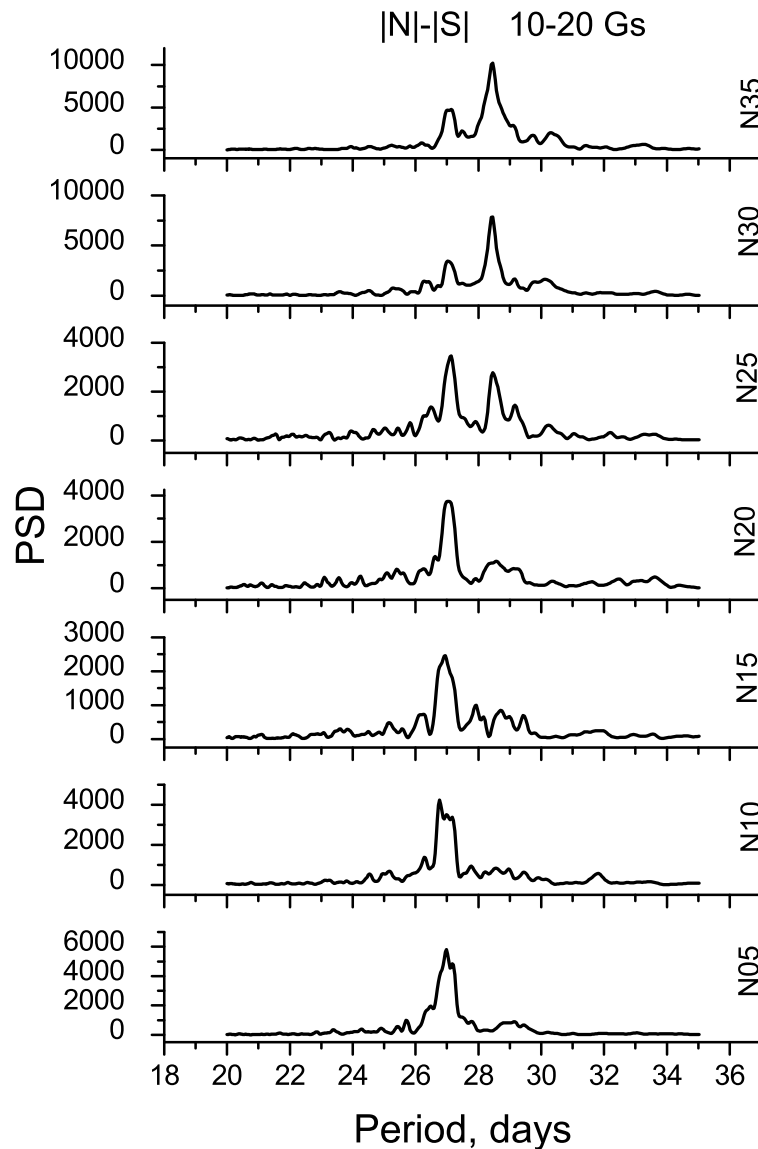
В работе (Зелык и др., 2009) определен широтный дрейф потока дисбаланса магнитных полей в целом и дрейф составляющих потока дисбаланса, обладающих наиболее мощными периодами вращения. Основными из полученных результатов являются следующие два:

- характер обоих дрейфов одинаков для полей с близкими напряженностями;
- для полей каждой напряженности существует широтная зона, в которой отсутствует широтный дрейф.

Отсюда возникают вопросы:

- Меняется ли вращение потока дисбаланса со временем, или одновременно существуют на Солнце структуры, вращающиеся с разными периодами?
- Как связаны во времени широтные дрейфы структур потока дисбаланса и структур, вращающихся со значимыми периодами?
- Совпадают ли структуры потока дисбаланса со структурами, вращающимися со значимыми периодами?

Попытаемся ответить на эти вопросы, сопоставив изменение со временем потока дисбаланса и характеристик вращения.



**Рис. 1.** Спектры мощности дисбаланса магнитных полей напряженностью 10–20 Гс в широтных зонах 5–35° северной полушферы

## 2 Исходный материал

В работе использованы синоптические карты напряженности продольного вектора магнитного поля Солнца, полученные в обсерватории Китт Пик (США) с 1 января 1977 г. по 30 сентября 2003 г. Этот материал был любезно предоставлен нам доктором Дж. Харви.

Из синоптических карт нами были построены временные ряды. Каждый член ряда представляет относительный суммарный магнитный поток на центральном меридиане для магнитных полей каждого из 14 интервалов напряженности  $B_{\pm k}$  от 0 до  $\pm 1500$  Гс и каждой пятиградусной широтной зоны от  $-90^\circ$  до  $+90^\circ$ . Поток определялся для площадки шириной  $1^\circ$  долготы и длиной  $5^\circ$  широты. Интервал времени между соседними членами ряда 0.0757 суток. Ряды, содержащие положительные члены, назовем N-рядами, а ряды с отрицательными членами – S-рядами. Из них были

построены временные ряды дисбаланса – суммы одноименных членов N- и S-рядов или разности их модулей. Полученные ряды назовем  $|N| - |S|$ -рядами. Каждый член такого ряда – относительный суммарный магнитный поток дисбаланса на центральном меридиане для магнитных полей каждого из 8 интервалов напряженности  $B_{\pm k}$  от 0 до  $\pm 200$  Гс и каждой пятиградусной широтной зоны от  $-70^\circ$  до  $+70^\circ$ . В таблице 1 приведены значения напряженности продольного магнитного поля для каждого интервала  $B_k$ .

**Таблица 1.** Принятые интервалы модуля напряженности

№ интервала, k	Граничные напряженности по модулю, Гс
1	5 – <10
2	10 – <20
3	20 – <50
4	50 – <200

Подчеркнем, что в данной работе использовались только относительные величины потоков магнитных полей без перевода в стандартные единицы.

### 3 Структуры потока дисбаланса и их изменение с широтой и временем

Результат вычислений потока дисбаланса в зависимости от времени и широты представлялся графически на картах, по оси X которых откладывалось время, по оси Y – широта. Значения потока дисбаланса в относительных единицах наносились на эту карту в виде изолиний. Такие карты были построены для четырех интервалов напряженности. Одна карта потока дисбаланса представлена на нижней панели рис. 2.

Сопоставление карт потоков для интервалов напряженностей 5–10 и 10–20 Гс показало, что эволюция потоков для них очень мало отличается. Существенные различия наблюдаются всего 2 раза: в 1985–1986 и в 1989 годах.

При сравнении карт для 10–20 и 20–50 Гс видны существенные отличия. Наиболее заметные из них (5 зон) приходятся на конец 22 цикла. Они появляются в 1992 г. на высоких широтах, а затем к 1999 г. спускаются к экватору.

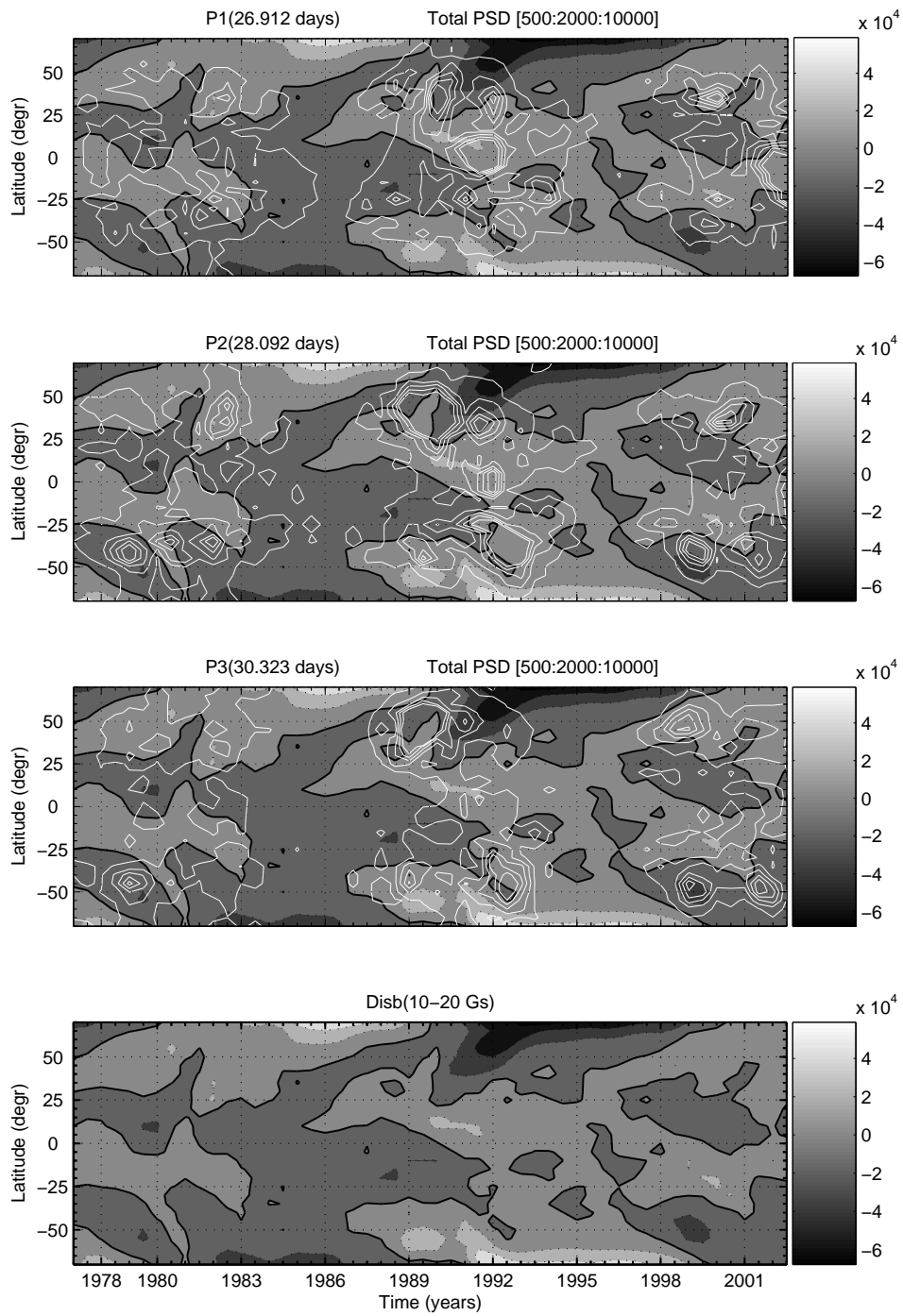
Карта потоков дисбаланса для напряженностей 50–200 Гс практически повторяет карту для 20–50 Гс. За исключением двух мест ( $\varphi = +20^\circ$  в 1985 г. и  $\varphi = -30^\circ$  в 1993 г.). Анализ структур потока дисбаланса и их изменения со временем позволяет сделать следующие выводы:

- время существования структур потока дисбаланса – около двух лет;
- наблюдается дрейф структур от широт  $+25^\circ$  и  $-25^\circ$  к полюсам и экватору;
- полушария Солнца несимметричны. В грубом приближении ось симметрии потока дисбаланса находится на широте  $-12^\circ$  в течение всех 26 лет.

### 4 Структуры потока дисбаланса, вращающиеся с выделенными периодами, и их изменение с широтой и временем

По годичным отрезкам всех рядов со сдвигом на полгода были построены спектры мощности. В этих спектрах выделены три значимых периода вращения, амплитуда мощности для которых достигает наибольшей величины и встречается на большем количестве широт. Эти периоды:

$$P_1 = 26.912, P_2 = 28.092, P_3 = 30.323 \text{ суток.}$$



**Рис. 2.** Карты суммарных мощностей в интервалах периодов  $P1 \pm 0.15$ ,  $P2 \pm 0.15$  и  $P3 \pm 0.25$  суток на фоне карты потока дисбаланса для напряженности магнитных полей 10–20 Гс. Нижняя панель – карта потока дисбаланса для полей той же напряженности 10–20 Гс

Назовем их выделенными периодами.

По всем спектрам были найдены суммарные мощности для интервалов периодов  $P1 \pm 0.15$ ,  $P2 \pm 0.15$  и  $P3 \pm 0.25$  суток. Они были представлены изолиниями на фоне карт потока дисбаланса, построенных для тех же напряженностей магнитных полей. Таких карт 12. На рис. 2 представлены карты суммарной мощности периодов P1, P2, P3 для магнитных полей с напряженностью 10–20 Гс.

## 5 Эволюция структур, вращающихся с выделенными периодами

Анализ полученных карт суммарных мощностей приводит к следующей картине эволюции структур, вращающихся с выделенными периодами.

На фоне структур потока дисбаланса в какой-то точке или небольшом широтном интервале возникают структуры, вращающиеся с выделенными периодами. Эти места не совпадают с точками возникновения структур потока дисбаланса. Положение и время возникновения структур отличаются для разных интервалов напряженности и разных периодов вращения.

Были отслежены смещения возникших структур, для которых суммарная мощность на картах была больше 500 ед. для всех трех значимых периодов. Рассматривалось 3 направления смещения: к полюсам (а), к экватору (b) и параллельно экватору (с). Каждая структура относилась к одному из этих направлений. Отношение числа структур, обладающих смещениями а, b, с, обозначим как а:b:c. Для полей разной напряженности такие подсчеты были проведены отдельно.

**Таблица 2.** Направление смещений структур вращения дисбаланса магнитных полей разной напряженности

Напряженность магнитного поля, Гс	Отношение а:b:c
5–20	23:4:1
20–200	7:13:8

Из таблицы 2 видно, что для слабых полей 5–20 Гс преобладает движение к полюсам, а для сильных полей 20–200 Гс – к экватору. В этом случае картина не столь четкая. К экватору движется лишь в 2 раза больше структур, чем к полюсам. Сравнение направления распространения структур вращения и структур потока дисбаланса, в которых они возникли, показало следующее.

1. Направления распространения структур вращения и структур потока дисбаланса, в которых они возникли, почти полностью совпадают.
2. Суммарная мощность структур вращения перестает расти, когда структура достигает 0-линии потока дисбаланса. Это справедливо для пяти случаев из шести.

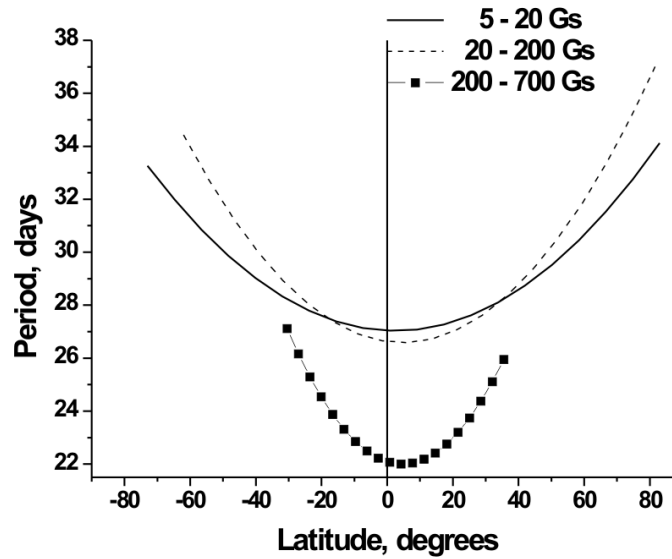
## 6 Заключение

Полученные результаты позволяют ответить на поставленные выше вопросы.

– *Меняется ли вращение дисбаланса со временем или одновременно существуют на Солнце структуры, вращающиеся с разными периодами?*

На Солнце на разных широтах одновременно существуют структуры с различными периодами вращения. Наиболее стабильное вращение происходит с выделенными периодами

$$P1 = 26.912, P2 = 28.092 \text{ и } P3 = 30.323 \text{ суток.}$$



**Рис. 3.** Аппроксимация полиномами второго порядка кривых дифференциального вращения всплывающих структур дисбаланса магнитных полей разной напряженности

– Как связаны во времени широтные дрейфы структур потока дисбаланса и структур, вращающихся со значимыми периодами?

Широтный дрейф структур, вращающихся с значимыми периодами, совпадает с дрейфом структуры потока дисбаланса, в котором находится структура вращения.

– Совпадают ли структуры потока дисбаланса со структурами, вращающимися с значимыми периодами?

Структуры потока дисбаланса не совпадают со структурами, вращающимися с значимыми периодами. Структура вращения при своем развитии может захватывать отдельные зоны структур потока разного знака. Характерным является лишь достижение максимума вращения в месте нулевой линии дисбаланса, т. е. при равенстве потоков “+” и “-” полей.

Вопрос о связи структур потока дисбаланса магнитных полей и структур вращения оказался более сложным, чем мы предполагали ранее. Он требует дальнейшего исследования.

На основе изученных нами результатов эволюция вращения дисбаланса магнитных полей может быть представлена следующим образом.

На диске Солнца существуют потоки дисбаланса магнитных полей разной напряженности. Для широтного дрейфа этих полей характерно существование выделенных широт ( $20-25^\circ$  в каждой полусфере), для которых дрейф отсутствует. От этих широт потоки распространяются к полюсам и к экватору.

На поверхность фотосферы всплывает структура дисбаланса магнитного поля, обладающая вращением, характерным для зоны ее образования. Места всплытия таких структур не связаны явно со структурами потока дисбаланса. Так же как и поток дисбаланса, структуры вращения начинают дрейфовать к полюсу или к экватору.

Суммарная мощность вращения растет по мере приближения к нулевой линии потока дисбаланса, т. е. к месту равенства потоков полей разных знаков.

Сместившись к полюсам или к экватору от широты всплытия, структуры с некоторым значимым периодом вращения перестают существовать как единое целое, уступая место другим структурам с иными значимыми периодами вращения.

Таким образом, дифференциальное вращение слоев, ответственных за образование структур вращения дисбаланса, можно определить по зависимости периода вращения от широты всплытия

структур вращения дисбаланса магнитных полей.

На рис. 3 представлена аппроксимация полиномами второго порядка кривых дифференциального вращения всплывающих структур дисбаланса магнитных полей разной напряженности. Кривые получены для всех значимых наблюдаемых периодов в интервале 22–36 суток.

Использованные в настоящей работе данные NSO/Kitt Peak получены при кооперации NSF/NOAO, NASA/GSFC и NOAA/SEL.

## Литература

- Андреева О.А., Зелык Я.И., Степанян Н.Н. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 2008. Т. 104. №. 1. С. 5.
- Андреева, Степанян (Andryeyeva O.A., Stepanian N.N.) // *Astron. Nachr.* 2008. V. 6. P. 579.
- Бабкок (Babcock H.W., Babcock H.D.) // *Astrophys. J.* 1955. V. 121. P. 349.
- Гопасюк С.И., Цап Т.Т. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 1974. Т. 49. С. 3.
- Зелык Я.И., Андреева О.А., Степанян Н.Н. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв., 2009. (в печати).
- Зелык Я.И., Степанян Н.Н., Андреева О.А. // *Проблемы управления и информатики.* 2008. (в печати)
- Котов В.А., Левицкий Л.С., Степанян Н.Н. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 1981. Т. 63. С. 3.
- Котов В.А., Левицкий Л.С. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 1983. Т. 66. С. 110.
- Котов В.А., Левицкий Л.С. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 1985. Т. 71. С. 32.
- Котов В.А., Степанян Н.Н. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 1980. Т. 62. С. 117.
- Котов В.А., Степанян Н.Н., Щербакова З.А. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 1977. Т. 56. С. 75.
- Котов В.А., Ханейчук В.И., Цап Т.Т. // *Кинем. и физ. небесн. тел.* 2002. Т. 18. №. 3. С. 205.
- Котов В.А., Ханейчук В.И., Цап Т.Т. // *Астрон. журн.* 1999. Т. 76. №. 3. С. 218.
- Котов В.А. // *Астрон. журн.* 2008. Т. 85. №. 5. (в печати).
- Котов В.А. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 2009. Т. 105. (в печати).
- Северный (Severny A.) // *Space Sci. Reviews.* 1964. V. 3. P. 451.
- Северный (Severny A.) // XII General Assembly IAU. Hamburg. Aug. 26. 1964a.
- Северный А.Б. // *Астрон. журн.* 1965. Т. 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.
- 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., Я.И. Зелык // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 2009. (в печати).