

УДК 523.945

Фракталы и возможная солитонная модель вспышек

Э.И. Могилевский, Н.С. Шилова

Институт земного магнетизма, ионосферы, и распространения радиоволн (ИЗМИРАН)

Поступила в редакцию 29 мая 2003 г.

Аннотация. Рассматриваются работы А.Б. Северного и сотрудников КраО по изучению тонкой структуры солнечной магнитоплазмы. Анализируется возможность солитонной модели солнечных вспышек, основанной на материалах наблюдений (фильтрограммы в CIV – 155 nm) с высоким пространственным разрешением ($\approx 1''$) на космическом аппарате TRACE. Показано, что основным носителем энергии вспышек могут быть солитоны.

FRACTALS AND POSSIBLE SOLITON MODEL OF SOLAR FLARES, by *E.I. Mogilevsky, N.S. Shilova*. The investigation of the fine structures of solar magnetoplasma by A.B. Severny and the Crimean Astrophysical Observatory staff was considered. The possibility of the soliton model of solar flares on the base of filtergrams (mainly the CIV 155nm line) with high spatial resolution ($\approx 1''$) obtained by spacecraft TRACE was analyzed. It is shown, that the basic source of energy of flares can be the solitons.

Ключевые слова: Солнце, вспышки, магнитные поля

Появившиеся в последние годы наблюдения Солнца с высоким пространственным и временным разрешением (5''–SOHO и 1''–TRACE) позволяют по-новому взглянуть на тонкую структуру вспышек и причину их возникновения.

Еще в 1961 году А.Б. Северный в работе совместно с А.Н. Коваль (1961) отметили во вспышке так называемые “усы” – эмиссионные элементы размером около 1'', скорости в которых варьировались в пределах 100 – 300 км/сек. Отмечалось также наложение спектров соседних элементов и признаки голубого смещения, т.е. подъема вещества. Многие выводы и других работ Андрея Борисовича значимы в настоящее время. Отметим некоторые из них: 1957 год – эмиссия вспышки сосредоточена в ядрах с размером иногда равным 0''4; 1954 год – выделяются вспышки, развитие которых сопровождается выбросом вещества. Однако сложность структуры магнитного поля в области вспышки заставляет Андрея Борисовича в 1970 году (Зверева, Северный, 1970) не рассматривать больше выброс как причину возникновения вспышки. Дело в том, что многочисленные работы сотрудников Крымской обсерватории, например работа Гопасюк и Огирь (1963), в последнее время В.И. Абраменко показали, что во вспышке наблюдаются области скрещивания и смыкания тангенциального поля противоположных направлений (названные областями бифуркаций). Изменения поля происходили в области размера меньше 2''5 × 4''5 (разрешение прибора). Упомянем еще роль ударных волн в моделировании вспышки, предложенное А.Б. Северным (1963), результатом которого было образование плотных плазмодов, стремящихся вверх со скоростями несколько сот километров в секунду. Несомненно, что вспышка на Солнце происходит в результате реализации (пересоединения) части энергии магнитного поля. Вопрос состоит в том, в каком пространственном масштабе это происходит, и какую роль при этом играет характерная тонкая структура магнито-плазмы активной области.

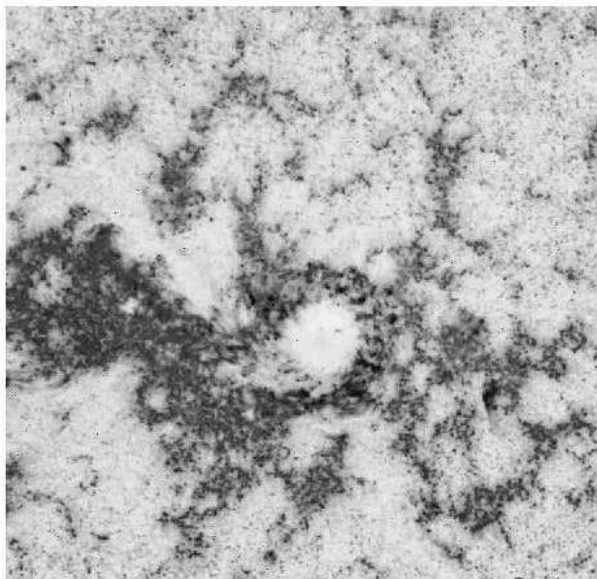


Рис. 1. Фильтрограмма, полученная на КА TRACE в C IV 28 ноября 2000 г. в активной области 9241, N09W02

Современные наблюдения на КА TRACE в линиях ультрафиолета в полосе 1600\AA C IV и далекого ультрафиолета 171\AA – Fe IX, Fe X, 195\AA – Fe XII позволяют вновь подчеркнуть определяющую роль выброса и тонкой структуры поля в образовании вспышки. Наблюдения показали, что наибольший контраст фильтрограмм в перечисленных линиях вспышки осуществляется в резонансном дублете $1548, 1550\text{\AA}$ C IV. При анализе фильтрограмм TRACE мы уделили наибольшее внимание фильтрограммам в дублете C IV. Температура свечения соответствующих линий далекого УФ близка к 10^5 градусов, это соответствует температуре нижней границы переходной зоны между хромосферой и короной, при однородных моделях атмосферы.

Наблюдения в резонансном дублете C IV наиболее перспективны для обнаружения мелкомасштабных структур, как в активных, так и в спокойных областях. Контраст в C IV (яркие точки вспышек) достигает 10-ти, тогда как в линиях далекого УФ не превышает $2\div 3$. Это позволяет увидеть тонкую структуру магнитоплазмы с предельным разрешением ($\sim 1''$). Это видно на рис. 1. По всему полю активной области без вспышки видно множество ярких точек размером 1000 км и меньше, они же очерчивают границы супергранул. Кроме того, сравнение фильтрограммы центра диска в этой линии и магнитограммы SOHO показывает их полное подобие с размером и структурой магнитного поля. Флоккулы состоят из таких же многочисленных самоподобных образований. Это дает основание считать, что мы имеем фрактальную среду (Могилевский, 2001). Если среда (солнечная атмосфера) состоит из множества самоподобных элементов (фракталов), образующих при взаимодействии кластеры и еще большего размера структуры, подобные исходным элементам, то это указывает на фрактальность атмосферы Солнца. Для описания такой среды используется математический аппарат с дробными производными. Во фрактальной среде проявляется ряд характерных свойств, в частности, процесс переноса (перколяция), связанный с коллективным движением фракталов. Важнейшей характеристикой фрактальной среды является Хаусдорфова размерность (она больше топологической), индекс связности и спектральная размерность. Фрактальная среда сугубо нелинейна, что существенно для определения волновых процессов в ней. Фрактальная среда определяется степенной инвариантностью. Так, например, для солнечных вспышек число степенной инвариантностью. Так, например, для солнечных вспышек число (N), интенсивность (P) и продолжительность (T) определяются (по длительному статистическому

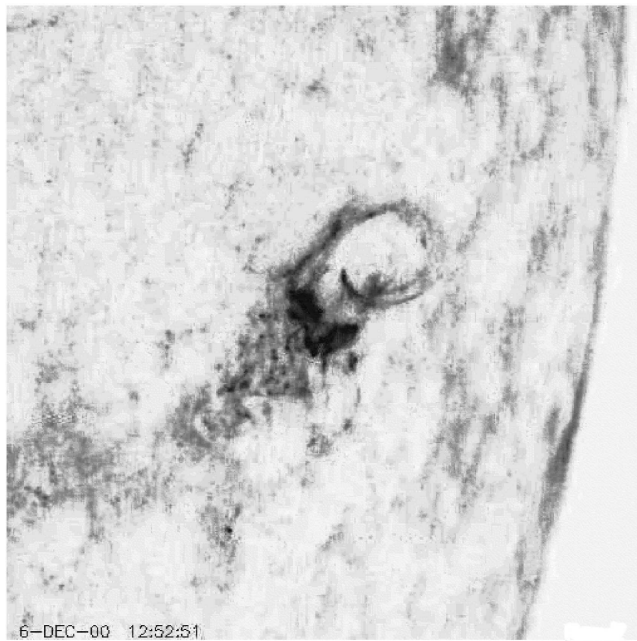


Рис. 2.

ряду) степенным спектром мощности типа “фликкер-эффекта”:

$$N = f^{-\alpha}$$

Параметр α (для числа вспышек $N = 1,4$), не изменяется при изменении N на пять порядков(!). Столь устойчивая степенная инвариантность с определенностью свидетельствует о фрактальной (дробной) структуре солнечной магнитопазмы. Самоподобие, самоорганизованность дискретных элементов определяют свойства солнечных явлений разного масштаба. Точечные структуры, образующие цепочки по границе супергранул, приведенные на рис. 1 – это и есть фрактальные элементы в переходной зоне активной области. В спокойной атмосфере эти структурные элементы были названы “moss” (мох) (Бергер и др., 1999)

Рассмотрим прилиम्бовую субвспышку C 2.4, произошедшую 6 июня 2000 года на фильмограмме в этой линии по кинофильму TRACE с интервалом между кадрами 30 секунд. В первые две минуты вспышка выглядела как спираль с рядом ярких малых элементов в ее узлах и протяженным свечением на вершине (рис. 2). Размеры узлов–“блос” близки к размерам ярких точек “моха”. Через две минуты конфигурация спирали изменилась: внутри первой появилась вторая спираль меньшего сечения, узлы которой поднимались со скоростью 150 км/сек. В результате произошел подъем всей структуры. В этом случае мы наблюдаем магнитопазменную структуру, подъем и формирование вспышки из сложных малых элементов.

Рассмотрим поведение таких структур в окрестности больших пятен. В CIV по периметру больших пятен при активизации наблюдается непрерывное истекание ярких элементов (“блос”) по направлению от центра пятна. Количество таких выбросов и их яркость резко увеличиваются перед вспышкой. В конце ноября 2000 года в области 9236 произошло несколько протонных вспышек (международная программа МЕОС). Особенностью этой АО было большое пятно с активным вытянутым ядром S полярности напряженности 2600 Гаусс. Выброс дискретных ярких плазменных образований происходил из внешней границы тени этого пятна. 23 – 24 ноября в западной части его всплывало новое поле S полярности. Динамика ярких блос кинофильма 1600 Å была такова: в 1328 UT в тени пятна возник яркий выброс, через 5 минут их стало два, через 30 минут – три, через

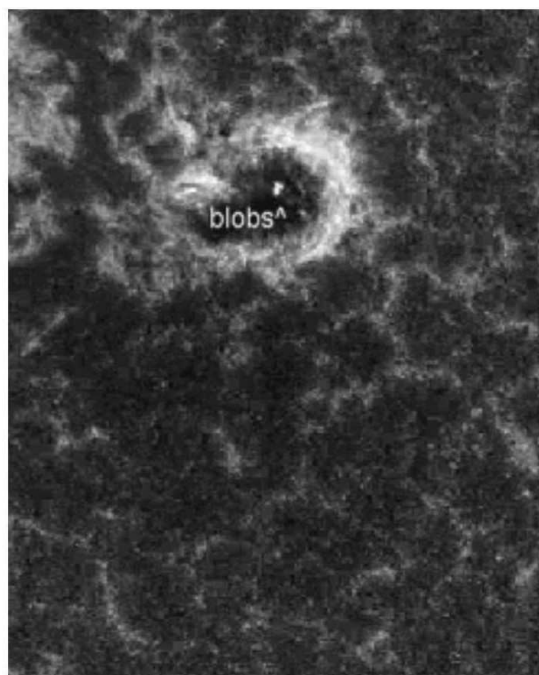


Рис. 3. (a)

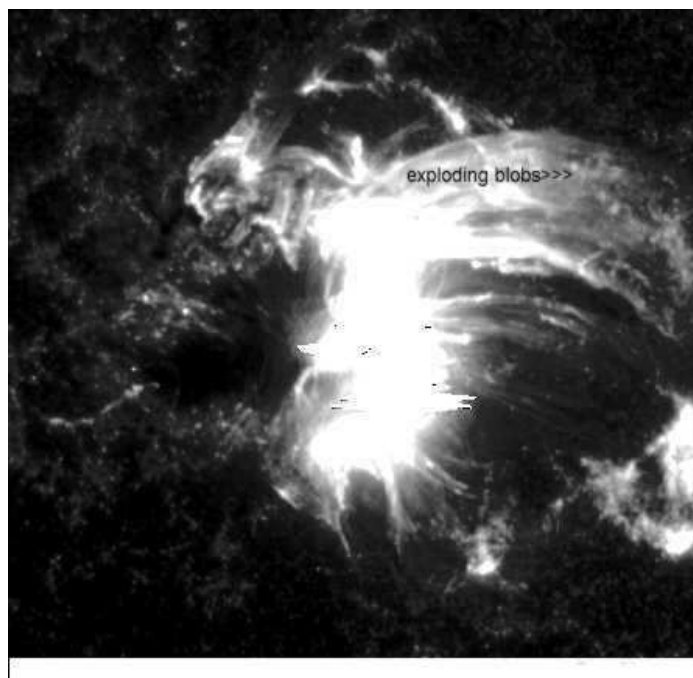


Рис. 3. (b)

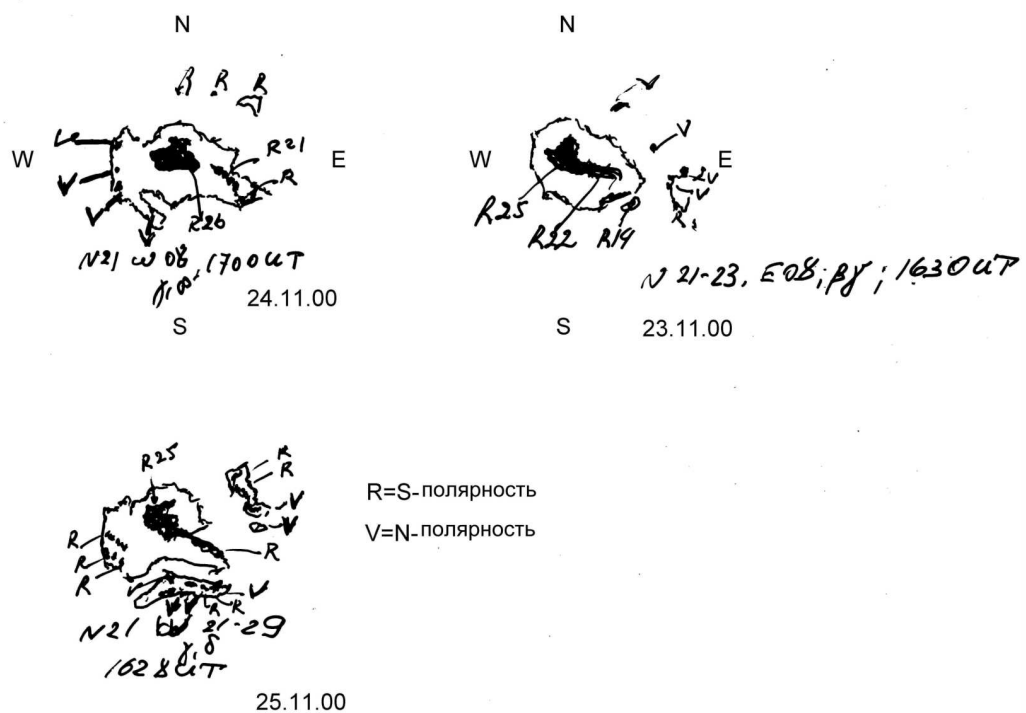


Рис. 4.

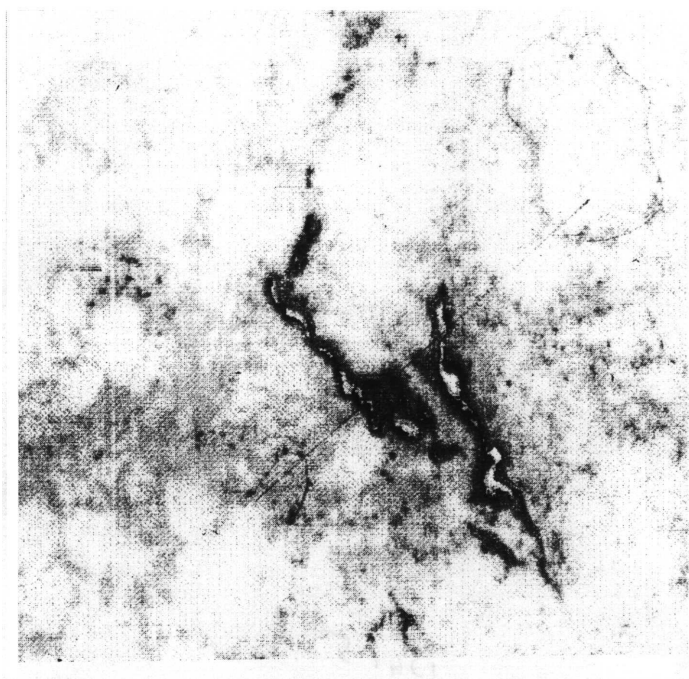


Рис. 5.

48 минут один из них “лопнул”, увеличив площадь своего свечения, и дав начало вспышке X2.3/2B (рис. 3a,3b). Блобс без заметного взаимодействия образовали яркое вспышечное кольцо вокруг пятна так, что вспышка в результате имела “рваную” структуру из-за участия индивидуальных блобс в ее формировании. В восточной, не затронутой вспышкой половине пятна, частота возникновения выбросов была существенно меньше (рис. 4). Заметим, что, как и во вспышке 6 декабря 2000 года, и в этом случае наблюдался выход мелкомасштабных элементов в поле одной полярности. Цепочка ядер N-полярности у кромки юго-западной границы пятна почти не задевалась эмиссией. Это исключает крупномасштабное магнитное пересоединение, как источник вспышки. Такая же особенность наблюдалась во вспышке в тени пятна 5 августа 2001 года.

Заметим, что блобс удается зафиксировать только в первые моменты возникновения вспышки, не позднее 5 минут после ее начала, пока свечения отдельных блобс не слились. Если вспышка располагалась далеко от лимба и на фильтрограммах в линии 171 Å, то для обнаружения блобс приходилось строить так называемые разностные фильтрограммы, когда из какой-либо последующей фильтрограммы вычитается предыдущая. В таком случае, например, вспышка 3B 6 июня 2000 года выглядела цепочкой нескольких десятков блобс вблизи и вдоль трассы волокна. Две ленты вспышки M1.2/2F 20 января 2001 года на кинофильме CIV отчетливо показывают фрагментарную структуру, каждая деталь которых, по-видимому, состоит из нескольких блобс (рис. 5).

Таким образом, вспышка в первые моменты состоит из большого количества мелких подобных друг другу структур. Их соединение в элементы, между которыми возможен обмен энергией – кластерами. Развитие системы блобс происходит по законам самоорганизации. Вспышечные блобс имеют все характерные свойства солитонов. Наблюдаемый поток блобс (солитонов) диссипирует (“лопаются”). В масштабе блобс и происходит процесс магнитного пересоединения. Вспышку следует рассматривать как последовательную совокупность потоков дискретных магнитных пересоединений в масштабе блобс (солитонов) (Кадомцев, 1991).

В неоднородной фрактальной среде солитоны могут образовывать связанные цепочки при дальних корреляционных связях (в однородной среде солитоны – уединенные волновые перемещающиеся возбуждения среды). Это соответствует тому, что дает для нелинейной фрактальной среды уравнение Син-Гордона (при $\beta < 1$) для низких частот колебаний. Солитоны – это одиночные импульсные слабо затухающие волны, возникающие в различных нелинейных средах со слабой дисперсией. В нашем случае – это волновое возмущение замагниченной плазмы на всех высотах солнечной атмосферы. В отличие от линейных волн солитоны в однородной среде не интерferируют, не дифрагируют, и своим поведением напоминают частицы. Солитоны иногда создают пары, если в их структурах имеется пульсирующий “хвост”. Они описываются нелинейными дифференциальными уравнениями. При плазменном факторе $b > 1$ (фотосфера и подфотосферные слои) образование МГД-солитонов может быть связано с распространением звуковой волны, которую возбуждает всплывающий субконвективный элемент магнитоплазмы в канале между конвективными ячейками. В среде с отрицательной слабой дисперсией и уменьшающейся плотностью движение солитона характеризуется уравнением Кортевега де Вриза (Могилевский, 2001). Решением этого уравнения является солитон, описываемый обратным квадратом гиперболического косинуса. Используемые нами наблюдения относятся к высотам переходного слоя и короны, т.е. мы не наблюдали блобс на фотосферном уровне. Поэтому следует учесть, что при плазменном факторе $b < 1$ солитонное решение даст уравнение Син-Гордона (нелинейность на низких частотах), характеризующее возмущение, идущее по цепочке связанных пульсирующих осцилляторов. В нашем случае это может быть совокупность фрактальных элементов, колебания которых происходят перпендикулярно оси цепочки. Солитон Син-Гордона записывается как \arctg от экспоненты. При этом уравнение дает и многосолитонное решение.

Петвиашвили и Похотелов (1988) показали, что устойчивость солитонных конфигураций повышается, когда альвеновские и звуковые волны взаимодействуют друг с другом, “зацепляются” друг за друга при образовании солитона. Несомненно, в атмосфере Солнца существуют как звуковые, так и альвеновские волны. Скорости обеих типов волн достигают величин 200 – 300 км/с в короне над активной областью.

Свойства блобс свидетельствуют в пользу их солитонной природы. Прежде всего, они демонстри-

руют одно из основных свойств солитонов – обратную пропорциональность ширины и амплитуды солитона. В нашем случае это обратная пропорциональность яркости блобс и времени их существования. Если яркие блобс во вспышке возникают через 2 – 3 минуты, то динамика менее ярких блобс в ближайшем флоккуле имеет период, приблизительно равный 30 минутам.

Блобс распространяются, следуя влиянию магнитного поля, при двухленточных вспышках вдоль трассы $H\alpha$ волокна. Блобс не взаимодействуют между собой, хотя “прилипают” и образуют группы по мере развития вспышки.

Полученная нами скорость подъема блобс, 200 км/с, близка к скорости, которую должны иметь солитоны Син-Гордона. Спираль, по которой они распространяются, похожа на решетку распространения солитонов, согласно уравнению Син-Гордона.

Солитоны распространяются так, что их скорость уменьшается с увеличением угла между волновым вектором и вектором магнитного поля. Это приводит к концентрации их возле нейтральной линии продольного поля активной области.

Приведем некоторые энергетические оценки. Используем диафрагму, равную одному пикселю изображения TRACE CIV -1° , и оценим интенсивность яркого блобс в первые моменты появления вспышки, а также яркость вспышки, когда она уже вступила в развитую фазу. Их значения практически совпадают, и в 3 – 5 раз больше яркости соседнего флоккула. Площадь вспышки средней мощности равна приблизительно ста пикселям, т.е. ста блобс.

Оценим энергию солитона. Согласно Карпману и Маслову (1991) энергия солитона s равна $(\pi/3)E_m c_s L_2$, где m – плотность магнитной энергии, s – скорость солитона, L – его размер. При поле над активной областью 300 Гаусс, скорости солитона 150 км/с и размере солитона около 10^8 см, энергия солитона переходной области будет около 10^{27} эрг. Полная общая энергия вспышки 10^{31} эрг, а в диапазоне 1500 – 2000 Å – 10^{29} эрг. Это значит, что вспышка должна обеспечиваться приблизительно сотней солитонов.

Существенно важным свойством фрактальной среды является так называемая самоорганизованная критичность (Робтнзон, 1994). Этот пороговый эффект самоорганизации, обнаруженный в лабораторных условиях в сыпучих средах, оказался справедливым и для фрактальной среды, в частности, для солнечной магнитоплазмы. Несколько авторов предложили модель солнечной вспышки, как процесс относительно длительного накопления энергии в совокупности фрактального множества активной области (Чарбонен, 2001). При достижении некоторого порога происходит сброс энергии и вещества, и система возвращается в исходное состояние. Из приведенных нами данных наблюдений на TRACE можно заключить, что при развитии активной области происходит накопление энергии в виде совокупности солитонов (блобс). Реализация этой энергии при достижении порога происходит каскадом магнитных пересоединений в масштабе совокупности солитонов с последующим сбросом вещества и плазмы и возвратом в исходное состояние. Такой процесс может неоднократно повторяться. Это происходит при длительной эмиссии больших вспышек.

Развитие этой схемы требует анализа генерации фрактального множества на фрактальной магнитной сетке.

В нашей работе рассмотрена только часть такой модели с использованием наблюдений во фрактальной сетке на уровне эмиссии, в основном, в резонансном дублете CIV переходной области. Отметим, что в модели магнитного пересоединения в масштабе солитонов отпадают трудности “стандартной” модели вспышек. В ней, как известно, магнитное пересоединение должно происходить в неструктурированном макромагнитном поле активной области.

Литература

- Ашванден (Aschwanden M.J., Poland A.I., Robin D.M.) // Ann. Rev. Astron. Astrophys. 2001. V. 38. P. 1.
- Абраменко В.Н., Гопасюк С.Н., Огарь М.Б. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 1990. Т. 81. С. 8.
- Бергер Н.Е. (Berger N.E., De Pontien B., Fletcher C.H. et al.) // Solar Physics. 1999. V. 191. P. 409.
- Гопасюк С.Н., Огарь М.Б. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 1963. Т. 30. С. 185.

- Зверева А.М., Северный А.Б. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 1970. Т. 41 – 42, С. 97.
- Карпман В.Н., Маслов Е.А. // ЖЭТФ. 1991. Т. 93. В. 5. С. 1696 – 1710.
- Кадомцев Б.Б. // Коллективные явления в плазме. 1988. М.: Наука. С. 303.
- Могилевский Э.И. // “МФизматлит”. 2001. С. 150.
- Петвиашвили В.И., Похотелов О.А. // Физика плазмы. 1988. Т. 12. В. 9. С. 1127.
- Робинзон П.Е. (Robinson P.E.) // Phys. Rev. 1994. V. 49. P. 409.
- Северный А.Б., Коваль А.Н. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 1961. Т. 26. С. 3.
- Северный А.Б. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 1963. Т. 30. С. 161; 1964. Т. 31. С. 159.
- Чарбонен Ф. (Charbonneau F., Scott W., McIntosh H., Boydar T.J.) // Solar Phys. 2001 V. 203. P. 321.