

УДК 523.98-334.7

Активные области в минимуме солнечного цикла и начало развития нестационарных процессов

И.Ю. Григорьева¹, А.Н. Шаховская², М.А. Лившиц³

¹ Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория, Санкт-Петербург, Россия
irinaga@gmail.com

² НИИ “Крымская астрофизическая обсерватория” КНУ им. Т. Шевченко, Научный, АР Крым, Украина, 98409
anshakh@yandex.ua

³ Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова, Троицк, Москва, Россия
maliv@mail.ru

Поступила в редакцию 28 октября 2013 г.

Аннотация. Рассмотрены активные области (АО), наблюдавшиеся в прошедшем длительном глубоком минимуме солнечной активности. Все 477 групп пятен, наблюдавшихся в 2007–2011 гг., разделены на три типа. Первый тип АО характеризуется отсутствием вспышек, что, по-видимому, связано с тем, что магнитные поля в короне были очень близки к потенциальным. Развитие явлений в АО второго типа рассматривается на примере событий в АО NOAA 10933 в период 8–10 января 2007 г. Показано, что началу вспышечной активности предшествует повышение уровня мягкого рентгеновского излучения, что часто связано со всплытием нового магнитного поля (как это происходило в АО NOAA 10933). Детально изучены особенности микроволнового излучения, и, в частности, для этой группы обнаружено появление нового источника поляризованного излучения на коротких волнах 1.76–1.84 см. Развитие слабых нестационарных процессов связывается с появлением и усилением токов в корональных слоях АО.

ACTIVE REGIONS IN THE SOLAR CYCLE MINIMUM AND BEGINNING OF NON-STATIONARY PROCESSES, *by I.Yu. Grigoryeva, A.N. Shakhovskaya, M.A. Livshits.* The active regions (AR) observed in the past long-term deep solar minimum are considered. All the 477 sunspot groups observed in 2007-2011 are divided into three types. The first type is characterized by the absence of flares what seems to be associated with the fact that magnetic fields in the corona were very close to potential ones. The development of events in AR of the second type is considered as an example of events in AR NOAA 10933 during January 8-10, 2007. The beginning of the flare activity is shown to precede the increase in soft X-ray radiation, that is often associated with the emergence of a new magnetic field (as it was in AR NOAA 10933). The features of microwave radiation were studied in detail, in particular, the emergence of a new source of polarized radiation at short wavelengths 1.76-1.84 cm was revealed for this group. The development of weak non-stationary processes is associated with the emergence and intensification of the currents in the coronal layers of AR.

Ключевые слова: активные области, радиоизлучение, нестационарные процессы

1 Введение

В этой статье кратко рассматриваются проблемы, связанные с возникновением активности на Солнце. В периоды минимумов цикла соответствующие источники отчетливо выделялись на низком уровне фона в рентгеновском и других диапазонах энергии фотонов и на картах магнитного поля. В большинстве групп пятен в эти периоды вспышки вообще отсутствовали, и только в некоторых из них эпизодически регистрировались слабые явления. Современная чувствительность аппаратуры в рентгеновском и радиодиапазонах позволяет изучать такие самые слабые проявления активности. Каким образом изменяются характеристики источников излучения, как это связано с особенностями магнитных полей и протеканием токов в короне? Эти проблемы сегодня стали возможными для исследования.

2 Статистический анализ АО, наблюдавшихся с 2007 по 2011 гг.

Прошедший минимум солнечной активности выдался довольно долгим и глубоким, поэтому оказалось возможным включить в рассмотрение не только сам минимум, но и начало 24-го цикла. За 2007–2011 гг. на Солнце по данным NOAA было отмечено 477 АО. Формально мы разбили это количество на 3 неравные группы, приняв за критерий значение балла вспышечной активности по классификации GOES. В первую группу вошли области, в которых в мягком рентгеновском диапазоне по данным спутника GOES не было зарегистрировано вспышек мощнее рентгеновского балла С. Их оказалось в данном временном промежутке больше всего – 295. Во вторую группу вошли области, в которых происходили вспышки балла С, но не было М и выше, количество таких областей составило 140. И, наконец, в третью, самую малочисленную группу вошли АО со вспышками М и Х балла, в этой группе оказалось всего 52. Уже по количеству вспышек в каждой группе АО можно сделать вывод, что для данного минимума более характерны области без значительных событий.

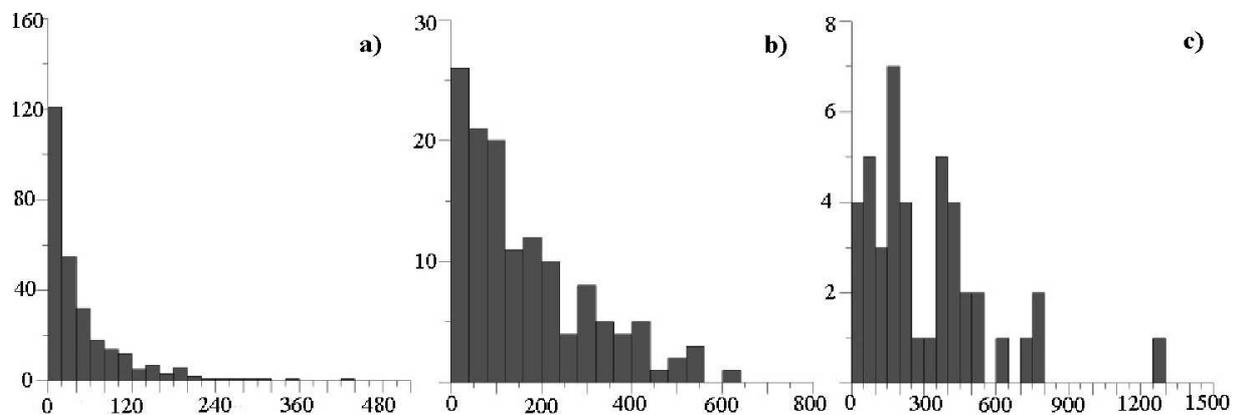


Рис. 1. Гистограммы распределения площадей АО: в первой группе – без вспышек (слева), во второй – со вспышками только балла С (центр), в третьей – со вспышками баллов М и Х (справа). По оси абсцисс – площадь пятен в миллионных долях солнечного диска, по оси ординат – абсолютное число АО. Для первой группы размер бара 20, для второй – 40, для третьей – 50

В каждой из вышеописанных групп мы построили распределение числа АО по площадям пятен, выраженных в миллионных долях площади диска Солнца, согласно сайту www.solarmonitor.org/. На рис. 1 (а) видно, что в первой, самой многочисленной группе распределение оказалось близким к нормальному с четко выраженным максимумом в интервале от 0 до 19 миллионных долей

полусферы (мдп). Во второй группе также преобладали области с небольшими площадями от 0 до 39 мдп, однако максимум оказался достаточно широким, и АО с площадями от 40 до 120 мдп было достаточно много (рис. 1 (b)). И, наконец, по последней группе – из-за ее малочисленности сложно сделать определенные выводы по распределению, однако заметно присутствие областей с площадями 350–550 мдп (рис. 1 (c)).

Таким образом, можно сделать следующие выводы: 1) для периода минимума 2007–2011 годов наиболее характерны АО без рентгеновских вспышек мощнее балла С и небольшими площадями. 2) АО, в которых происходят вспышки в период минимума, отличаются в целом большими площадями по сравнению с теми АО, где вспышки отсутствовали.

3 Эволюция рентгеновского и микроволнового излучения слабых АО

Предыдущее исследование при обычном уровне солнечной активности уже показало, что появление АО сопровождается усилением излучения в мягком рентгеновском и микроволновом диапазонах. Однако, например, в мягком диапазоне КА GOES (1–8 Å) при типичном уровне фона 10^{-7} Вт м⁻² Гц⁻¹ соответствующий вклад небольших АО оставался незаметным в регистрируемом потоке от всего Солнца. Ситуация резко изменилась в анализируемый нами период, поскольку на длительные интервалы времени уровень фона опускался вплоть до 10^{-9} Вт м⁻² Гц⁻¹. В таких условиях появление области с площадью пятен 10–30 мдп вызывало повышение излучения по крайней мере в несколько раз. Особенно отчетливо это наблюдалось в АО второго типа. Некоторые примеры приведены в работе Григорьевой и др. (2013), где продемонстрировано повышение рентгеновского потока для группы АО 10933, начавшееся 8 января 2007 г., сопровождавшееся примерно через сутки C1.7 вспышкой.

В данной работе мы уделяем внимание изучению наблюдаемых изменений потоков излучения на коротких волнах микроволнового диапазона, наиболее чувствительных к возмущениям, связанным со слабыми нестационарными процессами.

Данными с большой чувствительностью по потоку излучения в короткой части диапазона обладают регулярные наблюдения на радиотелескопе РАТАН-600, достигая предела плотности потока 0.5 мЯн. Это позволяет отслеживать динамику излучения и обнаруживать незначительные изменения, возникающие на различных стадиях развития активных областей (Богод, 2007).

Двумерные карты Солнца, получаемые на радиогелиографе Нобеяма на волне 1.76 см (NoRH), позволяют получить пространственное расположение источников в нижней короне и сделать оценку их физических характеристик (Накаджима и др., 1994).

На рис. 2 представлено отождествление локальных максимумов на одномерном профиле микроволнового излучения АО NOAA10933 (РАТАН-600, 09:20 UT) с источниками, видимыми на двумерных картах радиояркости, полученных на радиогелиографе Нобеяма (NoRH, 04:10UT) на близких волнах – 1.84 см (16.3 ГГц) и 1.76 см (17 ГГц) соответственно. Наблюдения во время кульминации на РАТАН-600 в 09:20 UT содержат наименьшие инструментальные ошибки. Двумерное распределение яркостной температуры (T_b) на картах NoRH, полученное в 04:10 UT, позволяет пространственно разрешить новый источник (цифра 2), расположенный к северо-западу от доминирующего источника над тенью основного пятна (цифра 1). Изображения на радиокартах приведены к моменту наблюдения на РАТАН-600. Уровень излучения “спокойного” Солнца вычтен из одномерных профилей Солнца. Радиокарты представлены в инвертированном виде, без учета уровня фонового излучения 1×10^4 (К) на волне 1.76 см для NoRH и имеют для каждой панели свою шкалу (бар внизу панели) интенсивности в Кельвинах.

Динамика микроволнового излучения на коротких волнах, показанная на рис. 2, обнаруживает ряд интересных особенностей, полученных накануне вспышечного события 10 января 2007 г. Во-первых, на профиле 7 января содержатся слева от доминирующего максимума два меньших по амплитуде локальных пика, отождествляющихся со слабыми радиоисточниками в хвостовой части АО (панель (a)). В последующие дни (8–10 января) излучение этих источников заметным образом не проявлялось. Во-вторых, фрагменты сканов Солнца демонстрируют появление нового источника

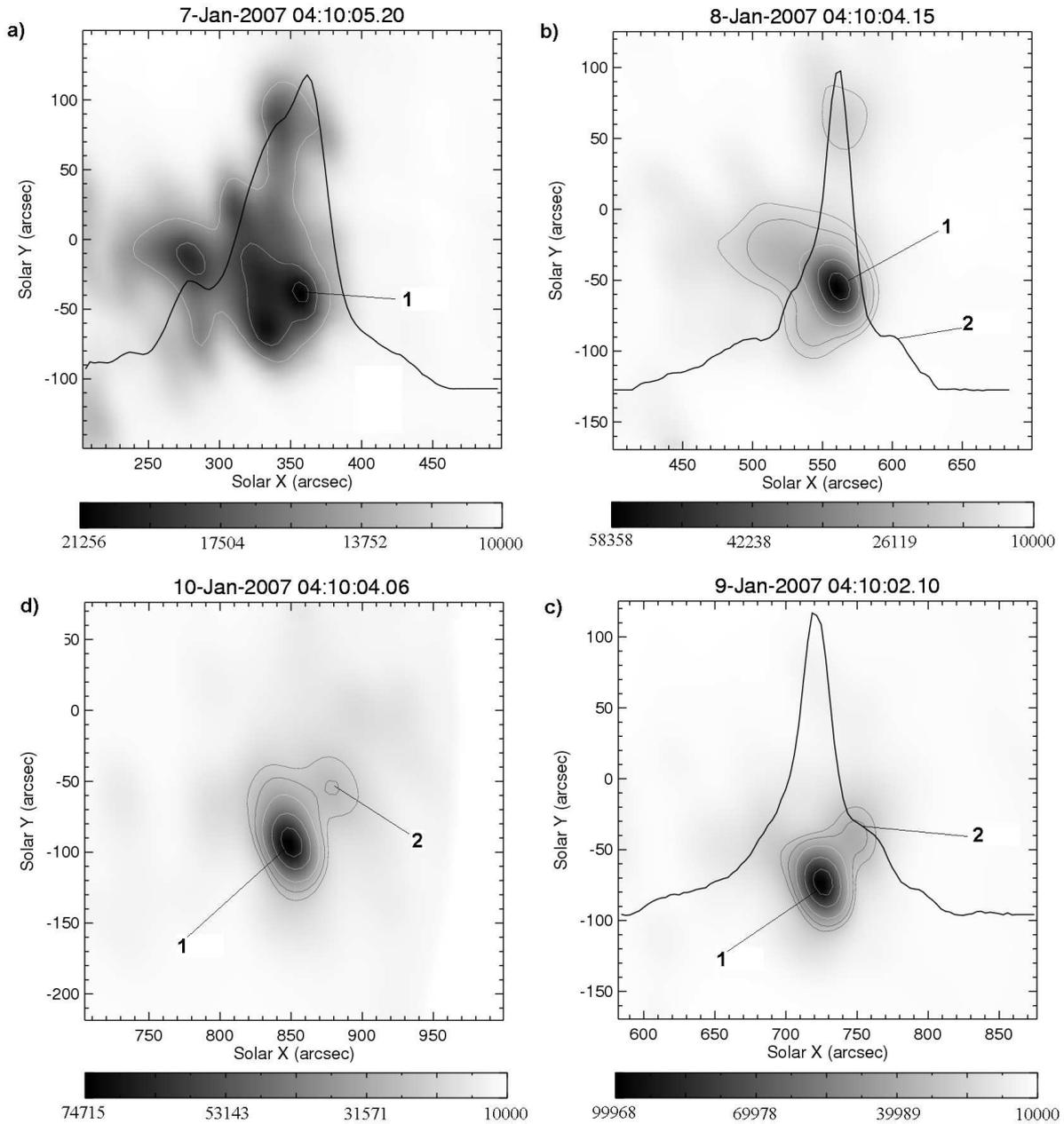


Рис. 2. Двумерные карты яркостной температуры (T_b) АО NOAA 10933 по данным NoRH на волне 1.76 см (фон), совмещенные с фрагментами сканов в 09:20 UT на волне 1.84 см (ПАТАН-600, параметр Стокса "I") на 7–9 января 2007 г. (сплошная черная кривая) соответственно. Контурные белые – 90, 70 и 50 % от максимума T_b , черные – 40 и 35 %. Цифры 1 и 2 – радиоисточники, соответствующие основному пятну в АО и новому – в северо-западной части АО. Шкалы карт указаны в угловых секундах, амплитуда профилей сканов – в относительных единицах. Бары фона внизу карт – шкала T_b в Кельвинах

микроволнового излучения в АО 10933 – заметный локальный максимум на профиле 8-го января, помеченный цифрой 2 (панель (b)) справа от доминирующего источника над пятном (цифра 1), обнаруживающийся и в последующие дни. В-третьих, можно заметить визуально увеличение амплитуды нового источника на 9 января (панель (c)), который, по-видимому, просуществовал до момента непосредственно самой вспышки.

Эволюция микроволнового излучения, прослеженная по картам распределения яркостных температур в АО, согласуется с изменениями, видимыми на профиле по одномерным данным РАТАН-600 (см рис. 2). На двумерной карте 7 января наблюдаются 3 заметных уярчения. Одно из них (помеченное цифрой 1) однозначно отождествляется с доминирующим пиком на одномерном профиле (панель (a)). Излучение, связанное со слабой АО NOAA 10934, расположенной к северу от исследуемой области (см панели (a,b)), не вносит заметный вклад в суммарное излучение групп и ослабевает к 9 января. Уярчение, помеченное цифрой 2 на панелях (c) и (d), четко согласуется с локальным пиком на одномерном скане, обозначенном ранее тоже цифрой 2 (см. панель (b)). Отсутствие такого уярчения на карте 8 января 2007 г. объясняется более поздним появлением нового радиоисточника, чем время наблюдений на радиогелиографе NoRH. Значения яркостной температуры у источника (1) показывают изменение интенсивности излучения: $T_b^i = 4.5 \times 10^4\text{K}$, $T_b^i = 8.6 \times 10^4\text{K}$ и $T_b^i = 6.3 \times 10^4\text{K}$ 8, 9 и 10 января соответственно. Значение яркостной температуры у нового источника (2): $T_b^i = 2.3 \times 10^4\text{K}$ и $T_b^i = 1.4 \times 10^4\text{K}$ на 9 и 10 января (данные NoRH).

Таким образом, на коротких волнах четко прослеживается динамика микроволнового излучения, связанного с появлением нового источника (цифра 2), близко расположенного к доминирующему источнику (цифра 1) над с основным пятном в АО 10933. Такая картина отражает перестройку в микроволновом диапазоне АО перед вспышечным событием 10 января 2007 года.

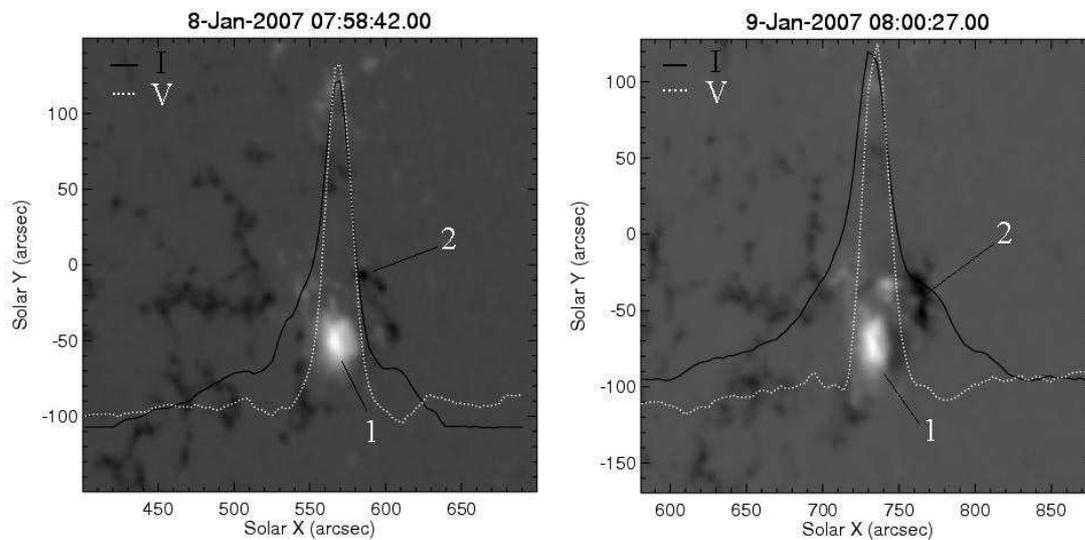


Рис. 3. Фрагмент LOS-магнитограммы АО NOAA 10933 по данным SOHO/MDI, совмещенный с профилем сканов РАТАН-600 на волне 1.84 см в 09:20 UT, на 8 и 9 января 2007 г. соответственно. Сплошная черная кривая – параметр Стокса “U”, пунктирная белая – “V” в относительных единицах. Шкалы магнитограмм указаны в угловых секундах. Цифрами указаны компоненты локального магнитного поля: 1 – поле основного пятна в группе, 2 – новое всплывшее поле противоположного знака

На рис. 3 сопоставлено распределение локального магнитного поля в АО 10933 и наблюдаемое излучение на микроволнах за 1 и 2 дня до вспышки 10 января. Данные приведены на ближайшие друг к другу моменты времени. Здесь следует отметить факт усиления локального поля противо-

положного знака (цифра 2) к северо-западу от основного пятна (цифра 1) и наличие небольшого локального максимума на профиле справа в канале интенсивности (параметр Стокса “Т”) от доминирующего пика, соответствующего источнику над основным пятном группы.

По двумерной карте на волне 1.76 см 9 января на рис. 2 (панель (с)) видно однозначное соответствие источника (2), расположенного к северо-западу от основного пятенного источника (1), локальному пику на одномерном фрагменте скана. Отсутствие такого источника 8 января, но наличие локального пика в профиле скана, свидетельствуют о времени начала события. Можно предположить, что при вспышке нового поля произошло ускорение некоторого количества электронов до энергий в десятки кэВ. И это развитие слабых нестационарных процессов с генерацией надтепловых частиц, по-видимому, началось позднее времени наблюдения NoRH – ближе к 9 часам 8-го числа. Это и отразилось на поднятии фона мягкого рентгеновского излучения по данным GOES. 9-го января источник (1) показал уменьшение степени поляризации с 90 % до 60 % при росте T_b на 40 %. Источник к северо-западу, помеченный цифрой 2, показал $T_b^i = 2.3 \times 10^4 \text{K}$ со степенью поляризации 4 %. На 10 января степень поляризации у источника (1) снизилась до 40 %, и значение T_b^i оказалось у обоих источников ниже почти на 30 % относительно предыдущего дня (данные NoRH).

В итоге можно сказать, что изменение характера микроволнового излучения, вызванное образованием нового поляризованного источника, зарегистрированного на коротких волнах, связано со вспышкой нового магнитного поля. Это явление охарактеризовалось вспышкой петли, имевшей в своих основаниях значение напряженности около 1000 Эрстед, вблизи основного пятна. Но не во всех 100 % случаев такое вспышки может быть явно видно. По-видимому, этот факт является одним из указателей начала нестационарных процессов в АО. Таким образом, в проанализированном случае вспышка поля сопровождалась развитием нового поляризованного источника и началом нестационарной активности в группе.

4 Заключение

В этой работе мы провели разделение АО, наблюдавшихся на Солнце в 2007–2011 гг., на три группы и изучили некоторые особенности их микроволнового излучения в связи с началом развития в них нестационарных процессов. Один из примеров – события 7–10 января 2007 года, обсуждаемые здесь более подробно. В группах с чисто потенциальным полем в короне вспышки отсутствуют. При вспышке нового магнитного поля развиваются уже токовые системы и затем увеличивается вероятность возникновения вспышек. В микроволновом диапазоне даже в самых слабых событиях это может проявляться как появление новых небольших источников поляризованного излучения. Заметим, что хотя токи в короне усилены фактически над всей нейтральной линией магнитного поля, очаги появляющихся слабых вспышек возникают в местах максимума плотности тока (Григорьева и др., 2013).

Можно указать еще ряд примеров, свидетельствующих о том, что вспышка нового магнитного потока инициирует последующее развитие нестационарных процессов. Однако, в принципе, это может быть не единственной причиной появления выбросов и вспышек. К сожалению, сейчас еще недостаточно данных, чтобы на статистически значимой выборке изучить вопрос о связи развития вспышек и вспышки поля. Этот вопрос заслуживает дальнейшего изучения.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 11-02-00264 и частичной поддержке программы Президиума РАН П-22. Авторы статьи благодарят сотрудников ИСЗФ СО РАН Г.В. Руденко, И.И. Мышьякова, С.В. Лесового и С.А. Анфиногентова за помощь в подготовке статьи и работе с данными ССРТ и NoRH.

Литература

- Богод В.М. // Труды Всероссийской конференции. Нижний Архыз. 28.09–02.10.2006. СПб: 2007. С. 2.
- Григорьева И.Ю., Лившиц М.А., Мышьяков И.И., Руденко Г.В. // Астрон. журн. 2013. Т. 90. № 8. С. 665.
- Накаджима и др. (Nakajima H., Nishio M., Enome S., Shibasaki K.) // Proc. IEEE. 1994. V. 82. P. 705.