О НАКЛОНЕ ОСИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ СОЛНЕЧНЫХ ПЯТЕН ПО НАБЛЮДЕНИЯМ НА МИКРОВОЛНАХ

Топчило Н.А.¹, Петерова Н.Г.²

¹СПбГУ, Санкт-Петербург, Россия
topchilona@yandex.ru

²СПбФ САО РАН, Санкт-Петербург, Россия
peterova@yandex.ru

ON THE TILT ANGLE OF THE MAGNETIC FIELD AXIS FROM SUNSPOT MICROWAVE OBSERVATIONS

Topchilo N.A.¹, Peterova N.G.²

¹St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia

²St. Petersburg Branch of SAO RAS, St. Petersburg, Russia

We propose a new method which allows measuring the tilt angle of the sunspot magnetic field axis from the vertical position in the solar corona. The method is founded on the characteristic feature of the cyclotron radiation – an intense depression along the magnetic field. The method consists in an analysis of time-varying sunspot picture at microwave owing to the Sun rotation, that is changes of the sight angle. Results measuring are given for main sunspots in active regions NOAA 11899 and NOAA 11944 using radio telescopes RATAN-600 and NoRH observations. Our study revealed that the tilt angle increases with a rise of an elevation above the photosphere, at the level of $(2-3) \times 10^3$ km it lies in the range of $\sim 10^\circ$ (e-mode) and $\sim 3^\circ$ (o-mode).

DOI: 10.31725/0552-5829-2018-373-376

Модель структуры магнитного поля (МП) одиночных пятен на Солнце, начиная с работы Каулинг [1], обычно представляется в виде симметричного веера силовых линий, расходящихся с высотой. При этом ось веера ориентирована перпендикулярно поверхности Солнца. Однако самые ранние наземные наблюдения продольной составляющей МП (в дальнейшем нашедшие подтверждение) уже показывали [2], что ось веера силовых линий поля наклонена к востоку на $\sim 20^\circ$. В противоречии с ними оказался анализ спутниковых данных (SDO) [3], согласно которому магнитная ось силовых линий пятна наклонена к западу на $8-10^\circ$. В целом, кроме противоречивости, наблюдательный материал остается недостаточным – число случаев исчисляется единицами.

Мы предлагаем новый метод измерения наклона оси МП солнечного пятна, основанный на отличительной особенности циклотронного механизма излучения – сильном подавлении излучения вдоль направления МП. Он состоит в анализе особенностей динамики изображения источника микроволнового излучения (ИМИ) над пятном в зависимости от угла зрения при изменении гелиографической долготы пятна, вызванной вращени-

ем Солнца. Особенности метода и результаты его применения к конкретным наблюдениям иллюстрируются на примере головных пятен в двух активных областях (АО): NOAA 11899 (ноябрь, 2013) – практически правильное одиночное пятно, и NOAA 11944 (январь, 2014) – сложное пятно в динамично развивающейся группе (рис. 1).

Рис. 1. Динамика изображения (сканы) активных областей NOAA 11899 и NOAA 11944 по наблюдениям на РАТАН-600 в о-моду излучения ($\lambda \leq 5\text{ см}$) в период ПЦМ (вверху). Внизу, карты МП и изображение АО в линии 304 Å по данным SDO (изофоты – границы тени и полутени пятен).

В рамках теории циклотронного излучения изображение ИМИ при угле зрения 0° для идеально круглого пятна имеет кольцеобразную форму, которая с увеличением угла трансформируется в подковообразную. При

одномерных наблюдениях (как на РАТАН-600 [4]) изображение ИМИ становится асимметричным – с максимумом в направлении ближайшего лимба Солнца. Это явление хорошо прослеживается для обоих представленных пятен, вне зависимости от их морфологических различий – в начале прохождения через центральный меридиан Солнца (ПЦМ) самым ярким является восточный край источника, в конце – западный, в середине наблюдается изображение с уплощенной вершинкой. Неожиданным результатом анализа РАТАН-изображений пятен оказалось, что появление плоской вершинки, которая могла бы свидетельствовать о наблюдении вдоль МП, происходит не точно при нахождении пятна на центральном меридиане и, более того, не одновременно для всех длин волн. Именно этот эффект «запаздывания\опережения» навел нас на мысль, что он связан с наклоном оси МП пятна, и позволил предложить новый метод измерений угла наклона, исходя из величины «запаздывания\опережения» в зависимости от длины волны.

Рассмотрение данных радиогелиографа NoRH на волне 1.76 см показало, что они находятся в согласии с одномерными наблюдениями РАТАН-600. На рис. 2 представлены изменения наибольшей яркости NoRH-изображения пятен в обоих АО со временем.

Рис. 2. Динамика максимальной яркости радиоизображения головных пятен в АО NOAA 11899 и АО NOAA 11944 по наблюдениям на радиогелиографе NoRH. Эффект «опережения\запаздывания» по отношению к моменту ПЦМ показан пунктирной линией, цифрами – угол наклона, соответствующий величине сдвига по времени.

Выбор параметра Тя (наибольшая яркость) для анализа динамики изображения АО связан с простотой ее измерения на картах NoRH. Видно, что максимальные значения яркости достигаются при нахождении АО

вблизи обоих лимбов Солнца, а минимальны для периода ПЦМ. Момент достижения минимума яркости также демонстрирует эффект «опережения\запаздывания». По его величине был вычислен наклон оси МП, оказавшийся равным 10° в е-моде и 3.3° в о-моде и направленным к востоку для пятна в NOAA 11899. Для пятна NOAA 11944 – $(3-5)^\circ$ в е-моде и $(2.5-3.5)^\circ$ в о-моде, направленным к западу (рис.2). Следует заметить, что в предложенном методе регистрируется не полный угол наклона МП, а только та его часть, которая изменяется при движении источника, т.е. угол в направлении вращения Солнца.

Результаты, полученные для пятна в NOAA 11899, полностью соответствуют устоявшимся представлениям о модели МП в виде петли, соединяющей головное пятно с диффузной хвостовой частью АО, ибо наклон МП оказался направленным в сторону востока, а угол наклона в е-моду превышал угол наклона в о-моду, которая генерируется ниже.

В случае пятна в NOAA 11944 ситуация значительно сложнее – измерения на NoRH показывают, что МП направлено на запад (обращение вида изображения пятна происходит до ПЦМ), а разница в величине наклона в е- и о-моду мала. Исследование магнитограммы и изображения АО в линии $304\text{\AA}$ (рис. 1) показывает, что магнитный поток пятна (N-полярности) замыкается не только на хвостовую часть своей АО, а и на область противоположной (S) полярности идущей впереди группы NOAA 11943, расположенной юго-западнее NOAA 11944. В пользу такого предположения свидетельствует и раздробленность тени исследуемого пятна. В итоге, результирующее МП оказывается слегка наклоненным (регистрируемый угол наклона мал) к западу. Заметим, что по данным РАТАН-600 у пятна в NOAA 11944 только самые короткие волны показывают наклон на запад, а более длинные, как и обычно, на восток.

Наблюдения на РАТАН-600 показывают, что с ростом длины волны угол наклона МП пятен увеличивается. В рамках дипольной модели МП пятен это объясняется ростом высоты ИМИ над уровнем фотосферы. В принципе, изменения угла наклона с высотой по спектральным наблюдениям на микроволнах можно в дальнейшем проследить на всем протяжении переходной области хромосфера-корона вплоть до высот ~ 10 тыс. км. Приведенные нами значения угла наклона, измеренные по наблюдениям на волне ~ 2 см, относятся к высотам $\sim$ нескольких тыс. км.

Работа частично поддержана грантом РФФИ 16-02-0749.

Литература

1. Т. Каулинг. Магнитная гидродинамика – М.: Изд. иностр. лит., 1959.
2. С.И. Гонасюк // Изв. КрАО, 1966, 35, 139.
3. O.S. Gopasyuk // Kinematics and Physics of Celestial Bodies, 2003, 19, 126.
4. Богод В.М., Алесин А.М., Перваков А.А. // Астроф. бюлл., 2011, 66, 223.