

УДК 523.98

## ДИНАМИКА ЛУЧЕВЫХ СКОРОСТЕЙ И МАГНИТНОГО ПОЛЯ В ФОТОСФЕРЕ СОЛНЦА ПРИ ВОЗНИКНОВЕНИИ МОЩНОЙ АКТИВНОЙ ОБЛАСТИ NOAA 10488

© 2007 г. В. М. Григорьев\*, Л. В. Ермакова, А. И. Хлыстова

*Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск*

Поступила в редакцию 12.02.2007 г.

Анализ магнитограмм продольного поля и доплерограмм, полученных на космической обсерватории SOHO, позволил обнаружить появление области усиленного подъема вещества в фотосфере при прохождении через нее вершины петлеобразной трубки магнитного поля, образующей крупную активную область. Максимальная скорость подъема достигала 2 км/с, максимальный размер превысил 20 000 км, время жизни составило около 2 ч.

*Ключевые слова:* Солнце, активные области, магнитное поле.

DYNAMICS OF LINE-OF-SIGHT VELOCITIES AND MAGNETIC FIELD IN THE SOLAR PHOTOSPHERE DURING THE FORMATION OF THE LARGE ACTIVE REGION NOAA 10488, by V. M. Grigor'ev, L. V. Ermakova, and A. I. Khlystova. Analysis of SOHO longitudinal magnetograms and Dopplergrams has revealed the appearance of a region of enhanced upflow of matter in the photosphere when the top of a loop-shaped magnetic flux tube forming a large active region passed through it. The maximum upflow velocity reached 2 km s<sup>-1</sup>, the maximum size exceeded 20 000 km, and the lifetime was about 2 h.

PACS numbers : 96.60.-j ; 96.60.Hv ; 96.60.Q-

*Key words:* Sun, active regions, magnetic field.

### ВВЕДЕНИЕ

Активные области возникают в результате выхода на поверхность магнитного поля. Трубка магнитного поля, сформированная под конвективной зоной (или в глубине конвективной зоны), всплывает вследствие магнитной плавучести (Паркер, 1955). Эта гипотеза активно разрабатывалась целым рядом авторов и является преобладающей уже на протяжении полувека. В случае всплытия трубки магнитного поля в фотосфере на ранней стадии формирования активной области должны наблюдаться два эффекта: а) появление магнитного поля, вектор которого первоначально параллелен поверхности, а впоследствии наклонен к линии раздела полярностей; б) подъем горизонтального магнитного поля и вещества.

Имеются наблюдения, которые расцениваются как прямое подтверждение этой гипотезы. Ежедневная регистрация вектора магнитного поля в активной зоне широт одного полушария, проведенная

в мае 1966 г. в Саянской обсерватории (Баппу и др., 1968), позволила изучить возникновение активной области среднего размера. В первый день существования группы пятен магнитное поле было сильно прижато к поверхности, в последующие дни угол между направлением поля и нормалью к поверхности уменьшался, причем противоположно направленные векторы магнитного поля были наклонены друг к другу. Описываемые наблюдения имели низкое временное и пространственное разрешение.

Наблюдения на более высоком уровне были сделаны спустя тридцать лет. Лайтс и др. (1998) с помощью стокс-поляриметра регистрировали не только выход магнитного поля, но и лучевые скорости движения замагниченной плазмы. Пространственное разрешение составляло порядка 1 сек. дуги. Они показали, что зона появления магнитного поля испещрена малыми транзитными горизонтальными магнитными элементами, ориентированными вдоль оси группы пятен и поднимающимися со скоростью 1 км/с. Эти данные позволи-

\* Электронный адрес: [vgrig@iszf.irk.ru](mailto:vgrig@iszf.irk.ru)

ли сделать заключение о том, что горизонтальные магнитные поля представляют собой вершины поднимающихся магнитных петель. В этой работе измерения начались уже после того, как все три наблюдавшиеся активные области были обнаружены в белом свете в виде пор.

Современные наземные инструменты обладают высоким временным и пространственным разрешением, но получение сложных характеристик, таких как вектор магнитного поля, при этих условиях возможно только для локальных участков поверхности Солнца. Нет надежных предикторов возникновения активной области, которые позволили бы начать наблюдения до того, как она появится в белом свете или в линии H $\alpha$ . Погодные условия и ночное время также вносят свои ограничения. Использование данных о продольной составляющей магнитного поля и лучевых скоростях, полученных с помощью космической обсерватории SOHO (инструмент MDI — Michelson Doppler Imager), существенно расширяет возможности исследования динамики магнитного поля. Непрерывность наблюдения всего диска Солнца и высокое временное разрешение позволяют получать информацию с первой минуты жизни активной области.

В данной работе исследовалась динамика магнитного поля и поля лучевых скоростей в фотосфере на ранней стадии развития мощной биполярной активной области по материалам SOHO MDI.

### НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЙ МАТЕРИАЛ И ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Изучалась активная область NOAA 10488, образовавшаяся 26 октября 2003 г. на участке с координатами N08 E28. Использовались магнитограммы продольного магнитного поля, доплерограммы и изображения в континууме в fits-формате, полученные на SOHO MDI. Данные по магнитному полю и лучевым скоростям имеют временное разрешение 1 мин, изображения в континууме — 96 мин. Пространственное разрешение составляет 4 сек. дуги. Доплерограммы подвергались предварительной обработке. Для исключения пятиминутных колебаний проводилось скользящее усреднение по пяти доплерограммам, после чего вырезался анализируемый участок с учетом смещения вследствие вращения Солнца. Чтобы определить нуль-пункт лучевых скоростей и исключить скорость вращения Солнца, строился дополнительный массив, который вычитался из исходного. Для этого проводилось осреднение трех верхних и трех нижних строк вырезаемой области и делалось линейное сглаживание осредненных строк, в результате получались верхняя и нижняя строки дополнительно массива. Для получения внутреннего поля массива выполнялась линейная интерполяция между

верхними и нижними пикселями столбцов, принадлежащих сглаженным строкам. Для магнитограмм также выполнялось скользящее усреднение по пяти кадрам.

На рис. 1 приведены изображения в белом свете за первые 4 дня существования группы пятен, с 26 по 30 октября, когда формировались главные пятна. Продольное магнитное поле активной области появилось в фотосфере 26 октября в 09:07 UT, первые поры сформировались до 11:12 UT. Рост магнитного потока примерно с постоянной скоростью продолжался до 29 октября, после чего замедлился. К 30 октября суммарная площадь пятен группы достигла 1800 мдп. Согласно данным Ньютона (1958) доля групп пятен подобного размера составляет менее 0.4%. В данной работе мы ограничились рассмотрением промежутка времени 06:06–13:00 UT 26 октября, который начинается за 3 ч до появления нового магнитного поля в фотосфере.

### РЕЗУЛЬТАТЫ

Картина появления и распределения нового магнитного поля выглядела следующим образом. К концу первого часа магнитное поле образовывало множество мелких холмов обеих полярностей, прилегающих друг к другу. Отсутствовала ориентированность магнитных диполей в направлении какой-либо оси. Область выхода магнитного поля имела округлую форму и занимала площадь, сравнимую с супергранульной; в течение 2–2.5 ч значимый выход магнитного поля происходил только на этом участке. Затем дополнительная зона выхода образовалась восточнее, однако она была более слабой. Это иллюстрирует рис. 2, на котором приведены парные кадры, состоящие из карты поля лучевых скоростей (вверху) с нанесенными изолиниями и карты продольного магнитного поля (внизу). Область выхода нового магнитного потока очерчена овалом. На картах лучевых скоростей участки движения в направлении наблюдателя (отрицательные значения скорости) показаны черным цветом, от наблюдателя — белым, изолинии нанесены противоположным цветом. Длинная стрелка на верхнем кадре 08:59 UT отмечает появление изолинии  $-400$  м/с, что мы отождествляем с подъемом вещества, связанным с выходом трубки магнитного поля. Спустя 8 и 13 мин на соответствующих кадрах 09:07 UT и 09:12 UT короткие стрелки отмечают появление холмов магнитного поля новой активной области.

На рис. 3 показаны графики, характеризующие динамику поднимающегося вещества в области выхода нового магнитного потока. На рис. 3а,б видно, что вблизи 09:00 UT в фотосфере начался подъем

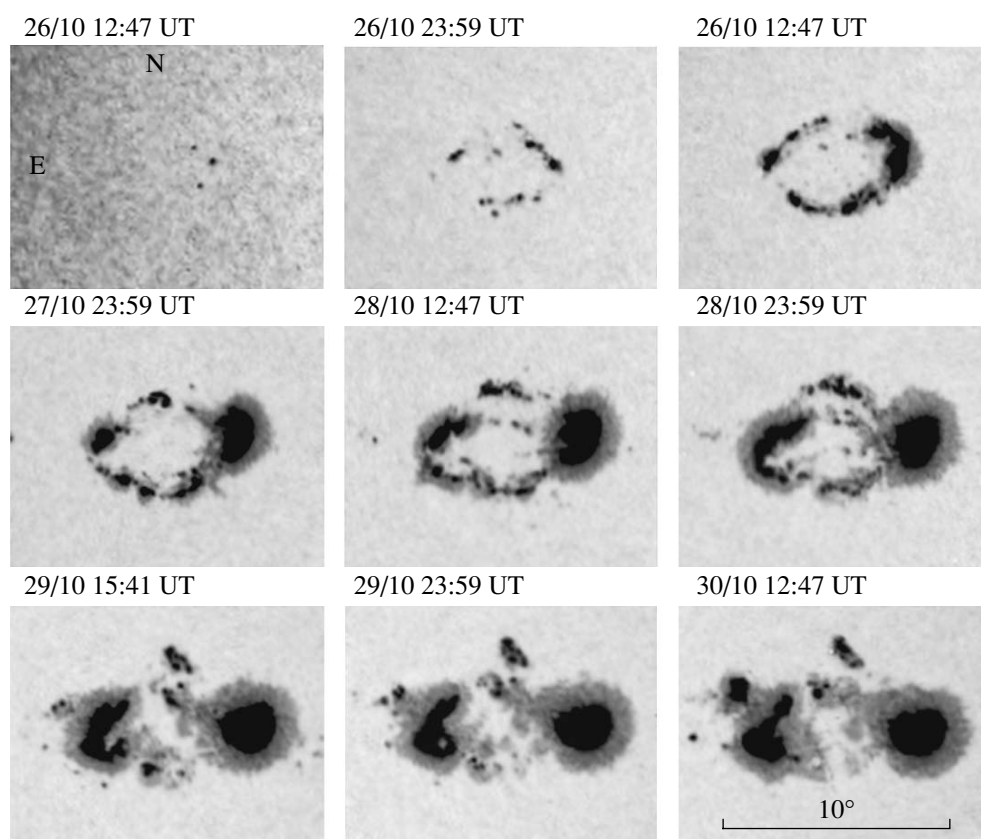


Рис. 1. Формирование группы пятен в активной области NOAA 10488 по изображениям в континууме SOHO MDI.

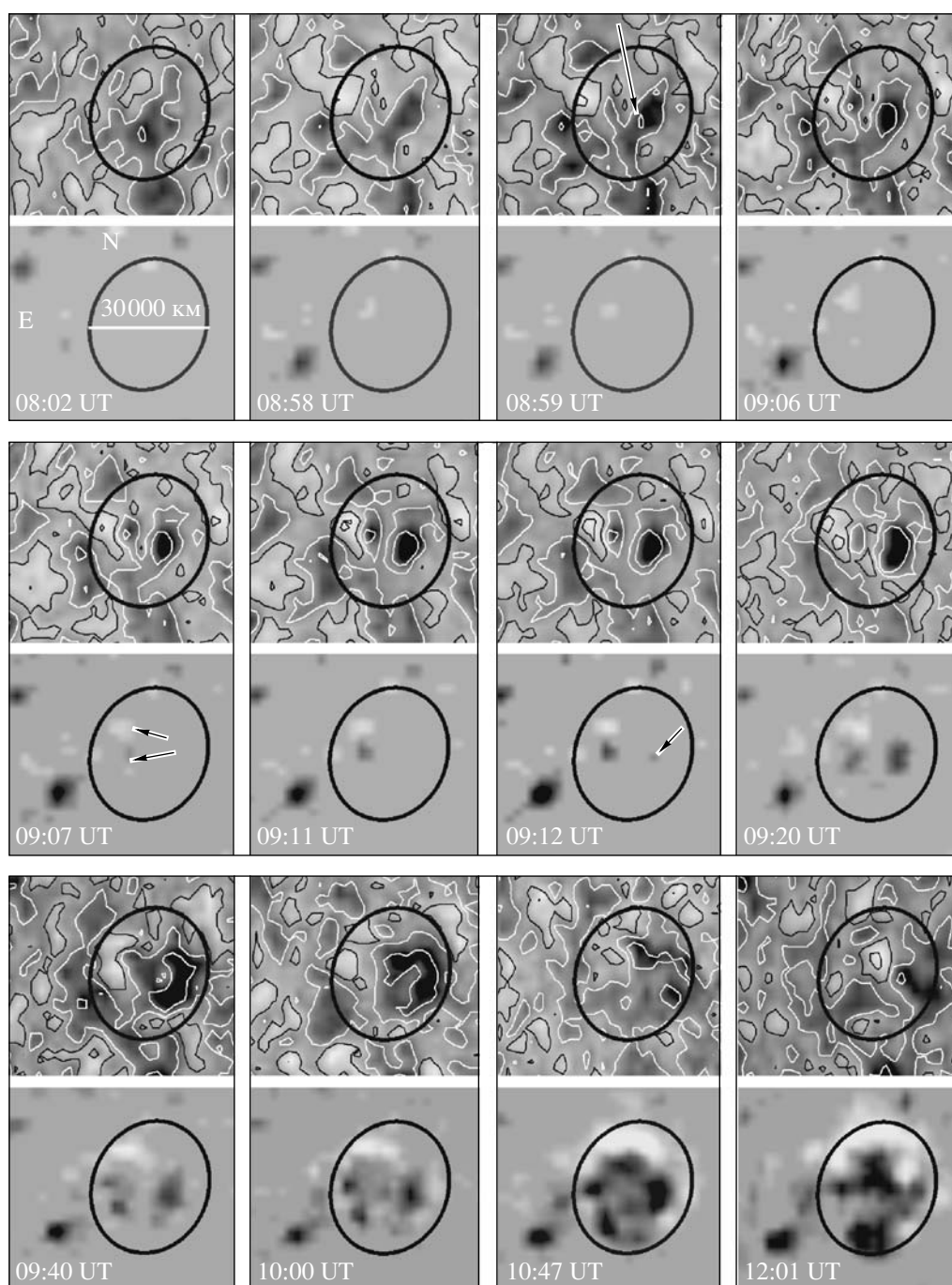
вещества с высокой скоростью. Скорость продолжала расти в течение 20 мин, после чего стала уменьшаться и через 2.5–3 ч сравнялась с фоновой. Если исключить вклад горизонтальных движений в лучевую скорость, то максимальное значение скорости подъема с учетом гелиоцентрического положения участка составило 2 км/с. Средняя лучевая скорость в направлении наблюдателя в течение двух часов составляла  $\sim 230$ – $330$  м/с, с учетом гелиоцентрического угла это соответствует скорости подъема  $\sim 260$ – $370$  м/с.

Опережение подъема вещества по сравнению со временем появления в фотосфере продольного магнитного поля активной области (см. рис. 2) является реальным фактом. Время появления биполярного магнитного поля по усредненным магнитограммам определяется визуально с точностью 1 мин. В соответствии с результатами Лайтс и др. (1998) начало подъема вещества можно связать с выходом горизонтального магнитного поля, расположенного в вершине поднимающейся магнитной петли.

Область подъема расширялась по мере выхода нового магнитного потока в течение двух часов, ее окружала зона опускания. Согласно рис. 3в максимальная площадь, ограниченная изолинией

–100 м/с, сохранялась примерно в течение получаса (10:10–10:45 UT) и составляла  $\sim 3.5 \times 10^8$  км<sup>2</sup>, что дает поперечный размер круговой области подъема  $\sim 21\,000$  км. Частично отдельные холмы поля выходили за границы области подъема, но линия раздела полярностей в большинстве случаев оставалась внутри. Это говорит о том, что горизонтальное магнитное поле, располагающееся на линии раздела полярностей, поднимается. Спустя 2 ч такая упорядоченная картина нарушилась. Область подъема раздробилась, в “дырках” началось опускание вещества. По-видимому, вид движений теперь связан с магнитными структурами меньшего масштаба. Спустя примерно три часа после начала выхода биполярного магнитного потока новое поле стало появляться к востоку от места первичного выхода (кадр 12:01 UT на рис. 2). В поле скоростей на этот раз не было таких ярких проявлений, как в первом случае.

Тверской (1966) предложил гипотезу, согласно которой образование активных областей происходит в результате усиления слабого магнитного поля движениями в конвективных ячейках-супергранулах. В последние годы эта гипотеза разрабатывается Гетлингом (2001), при этом в качестве одного из наблюдательных свидетельств в

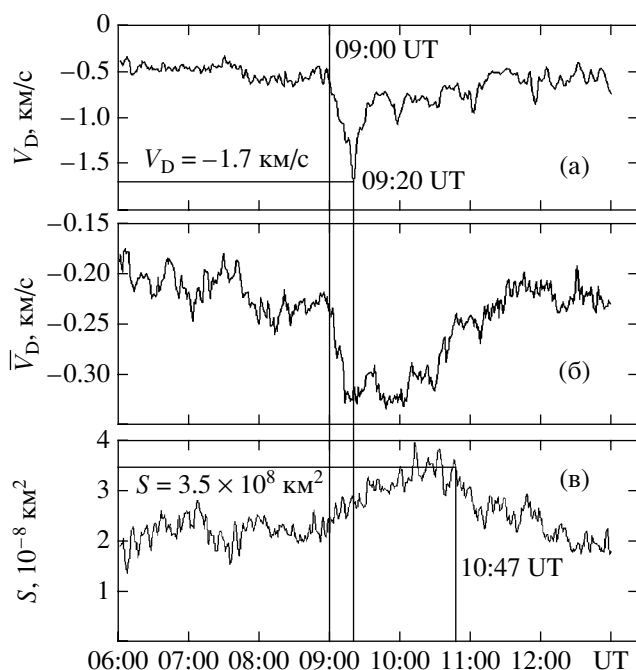


**Рис. 2.** Карты поля лучевых скоростей с нанесенными изолиниями  $\pm 100$ ,  $\pm 400$  м/с и магнитограммы продольного поля, показывающие динамику вещества и магнитного поля при образовании активной области.

ее пользу выдвигается результат Бумбы (1967) о кратности площадей пятен площади супергранулы. Отмеченная выше близость размеров области выхода магнитного потока и конвективных ячеек-супергранул не может быть серьезным аргументом в пользу того, что формирование магнитного потока новой активной области связано с усилением магнитного поля конвективными течениями, поскольку обнаруженные скорости подъема в несколько раз

превышают скорости подъема в супергранулах. Скорее это может указывать на взаимодействие всплывающей петли магнитного поля и окружающей конвекции, которая ограничивает размер области выхода магнитного поля.

Цван (1985) высказал мнение, что поднимающаяся петля должна создавать и поддерживать конвективный пузырь, перемещающийся вместе с вершиной петли. Мы полагаем, что обнаружили



**Рис. 3.** Графики изменения со временем максимальной доплеровской скорости  $V_D$  (а), средней скорости  $\bar{V}_D$  внутри контура, очерченного изолинией  $-100$  м/с (б), и площади  $S$ , ограниченной изолинией  $-100$  м/с (в), в области выхода магнитного потока.

именно это явление. Высокая скорость подъема вещества, очевидно, обусловлена мощностью и компактностью трубки потока.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обнаружено появление области усиленного подъема вещества в фотосфере при прохождении

через нее вершины петли магнитного потока, образующей большую активную область. Размер области подъема превышает  $20\,000$  км, максимальная скорость подъема  $2$  км/с, время жизни  $\sim 2$  ч.

Этот результат может быть использован при построении моделей образования активных областей.

Авторы благодарны команде SOHO/MDI за возможность доступа к базам данных по сети Интернет. Мы также благодарим анонимного рецензента, замечания и советы которого способствуют дальнейшему развитию работы. Работа выполнена при поддержке грантов программы поддержки ведущих научных школ РФ НШ-4741.2006.2 и программы Президиума РАН “Солнечная активность и физические процессы в системе Солнце–Земля”.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баппу и др. (M.R.V. Bappu, M.V. Grigorjev, and V.E. Stepanov), *Solar Phys.* **4**, 409 (1968).
2. Бумба (V. Bumba), *Rendiconti della Scuola Internazionale di Fisica “E. Fermi”* **39**, 77 (1967).
3. Гетлинг А.В., *Астрон. журн.* **78**, 661 (2001).
4. Лайтс и др. (B.W. Lites, A. Skumanich, and V. Martinez Pillet), *Astron. Astrophys.* **333**, 1053 (1998).
5. Ньютон (H.W. Newton), *Face of the Sun* (London: Penguin Books, 1958).
6. Паркер (E.N. Parker), *Astrophys. J.* **121**, 491 (1955).
7. Тверской Б.А., *Геомагн. и аэрон.* **6**, 11 (1966).
8. Цван (C. Zwaan), *Solar Phys.* **100**, 397 (1985).