

МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ КРУПНОМАСШТАБНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЦИКЛОВ АКТИВНОСТИ

Тлатов А.Г., Березин И.А., Тлатова К.А.

Кисловодская Горная астрономическая станция ГАО РАН, Кисловодск, Россия

MODELING THE FORMATION OF A LARGE-SCALE MAGNETIC FIELD AND FORECASTING ACTIVITY CYCLES

Tlatov A.G., Berezin I.A., Tlatova K.A.

Kislovodsk Mountain Astronomical Station of the Pulkovo observatory, Kislovodsk, Russia

We studied the formation of the large-scale magnetic field using the Solar Flux Transport (SFT) model. We tested the model using test bipoles to test the model. We showed that for given transport parameters such as the diffusion coefficient, the meridional circulation velocity, and the tilt angle of the magnetic axis of the test bipoles, it is possible to find a latitude θ_1 at which the magnetic field from the leading polarity region penetrates into the opposite hemisphere, and a dipole magnetic field of the Sun is formed. At $\theta > \theta_1$ the magnetic field does not penetrate into the opposite field and the large-scale magnetic field tends to zero over time. Based on this, we concluded that active regions with latitude $\theta < \theta_1$ are important for the next activity cycle. We proposed prognostic indices for predicting the amplitude of activity cycles based on sunspot data in the current activity cycle with a correlation coefficient $r > 0.8$.

<https://doi.org/10.31725/0552-5829-2024-303-306>

Модель переноса поверхностного потока (далее SFT) основана на идее, первоначально сформулированной Лейтоном [1]: радиальный магнитный поток на солнечной поверхности ведет себя как пассивное скалярное поле. Это значит, что поток переносится горизонтальными потоками плазмы, но без обратной реакции на эти потоки. Модель SFT оказалась успешной при воспроизведении структуры магнитного потока на реальной солнечной поверхности (фотосфере). В целом, успех модели SFT привел к важным приложениям как в качестве внутреннего граничного условия для экстраполяции магнитного поля в солнечной атмосфере, так и как внешнее граничное ограничение для моделей внутреннего динамо Солнца.

Мы реализовали SFT модель, используя разностную схему, аналогичную [2]. С помощью SFT модели можно проверить роль переноса магнитного потока полей ведущих областей AR через экватор, для формирования поля дипольного типа [3].

На рис. 1 показано SFT-моделирование солнечного цикла, в которое на основе магнитографических наблюдений были вставлены новые активные области. При соответствующих параметрах широтно-временная в модели SFT (рис. 1b) хорошо соответствует наблюдаемому графику времени-

широты (рис. 1а) на всех широтах. Основными параметрами потока, которые следует выбрать, являются меридиональный профиль потока $u\theta$ (θ) и коэффициент диффузии η . Характер магнитного потока в модели SFT в значительной степени определяется задаваемым членом $S(\theta, \phi, t)$, который представляет собой появление новых макроскопических активных областей на поверхности Солнца.

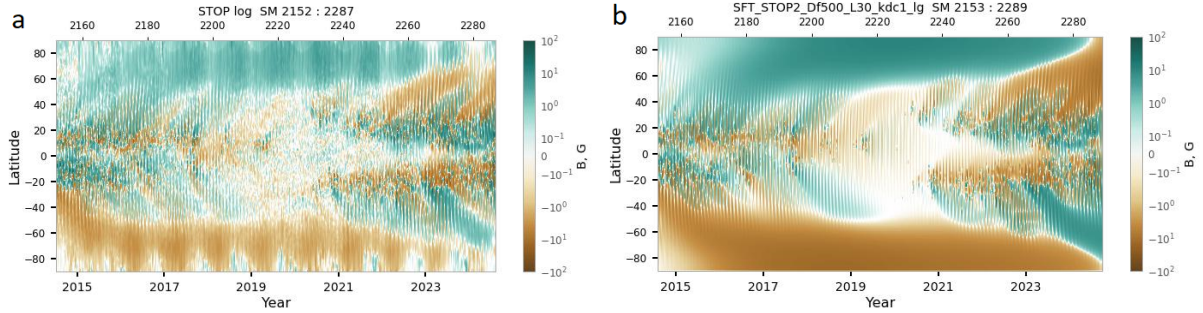


Рис. 1. Слева. Суперсиноптическая карта по наблюдениям магнитографа СТО. Справа. Моделирование поверхностного магнитного поля

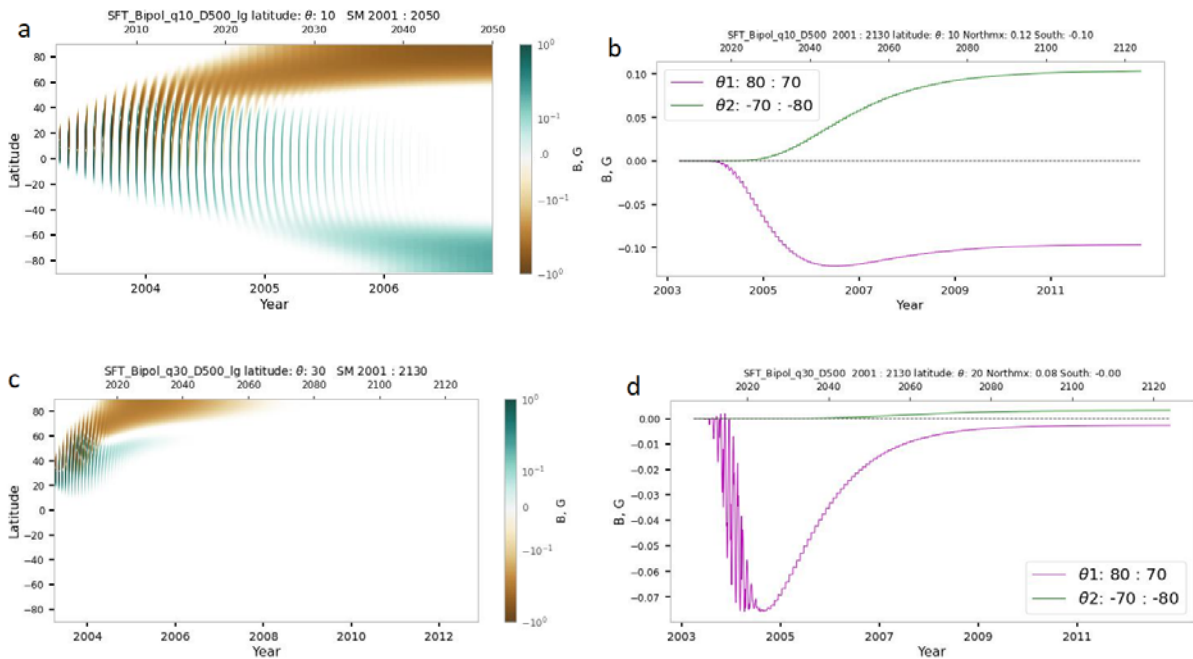


Рис. 2. а) Диаграмма в координатах широта-время для биполя на широте $\theta = 10^\circ$ при $\eta = 500 \text{ км}^2/\text{с}$. б) Интенсивность магнитного поля в приполярных областях для биполя (а). с) Тоже, что и (а), но для биполя на широте $\theta = 30^\circ$. д) тоже что и (б), но для биполя (с).

Поскольку классическое уравнение SFT линейно относительно B_z , решение представляет собой суперпозицию решений для каждой отдельной активной области, поэтому целесообразно рассмотреть отдельно эволюцию одной из этих областей.

Традиционно модели SFT рассматривают каждую активную область как биполярную магнитную область (BMR), с круговыми пятнами потока,

центрированными на локальных полюсах (θ^- , φ^-) и (θ^+ , φ^+). Такое представление соответствует закону Джоя в том смысле, что ведущая полярность находится ближе к экватору. На рис. 2 представлены диаграммы изменения поверхностного магнитного поля для пробных биполей на широте $\theta = 10^\circ$ и широте $\theta = 30^\circ$. Тильт-угол был выбран 10° , коэффициент диффузии $\eta = 500 \text{ км}^2/\text{с}$, меридиональная скорость и дифференциальное вращение согласно [2]. Мы видим существенное различие в поведении поверхностного магнитного поля. Для биполя на относительно высокой широте $\theta = 30^\circ$ поле на северном полюсе со временем стремится к нулю. Для низкоширотного биполя $\theta = 10^\circ$ магнитное поле Солнца со временем становится дипольным. Как известно из динамо теорий, дипольное крупномасштабное поле является источником нового цикла активности. Таким образом, мы можем предположить, что только низкоширотные активные области влияют на следующий цикл активности.

Мы можем сконструировать прогностические индексы на основе гипотезы о различном вкладе активных областей в зависимости от их широты. Мы использовали данные групп солнечных пятен по данным RGO/UASF за период N: 13–25 циклов активности (<http://solarcyclescience.com/activerregions.html>).

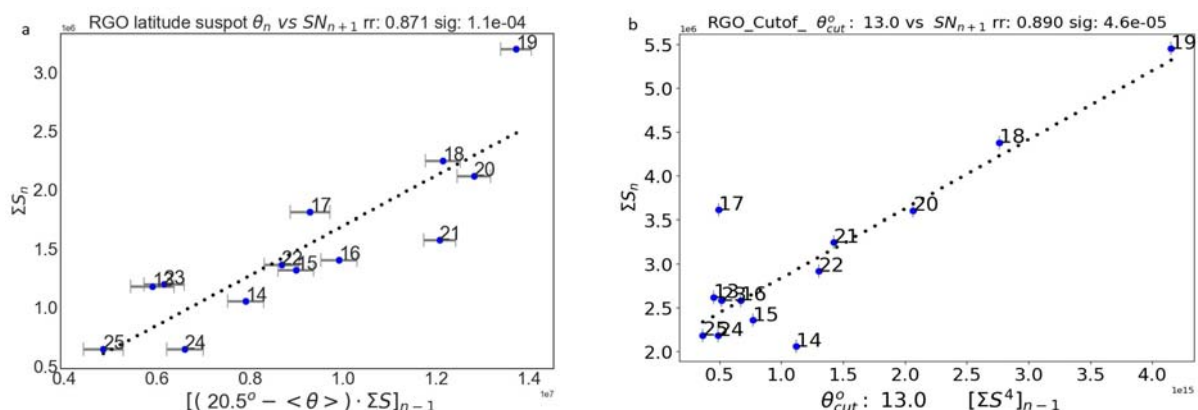


Рис. 3. Прогноз амплитуды следующего цикла активности в $\text{Sum}(S)_n$ в зависимости от индекса АО на низких широтах. а) Индекс от медианной широты $\langle \theta \rangle$ и пороговой широты 20.5° . б) Индекс пятен с широтой менее 13° .

На рис. 3 представлены такие индексы. На рис. 3а используется медианная широта АО $\langle \theta \rangle$, при этом коэффициент корреляции с амплитудой следующего цикла составила $r = 0.871$. На рис. 3б представлен индекс, в котором учтены АО с широтой менее $\theta < 13^\circ$. В этом индексе площадь пятен текущего цикла включена со степенью S^4 . Коэффициент корреляции индекса с амплитудой последующего цикла составил $r = 0.89$.

В обоих прогностических индексах присутствует критическая широта θ_{cr} . Чем больше АО с широтой менее этой величины $\theta < \theta_{\text{cr}}$, тем больше ожидаемая амплитуда следующего цикла активности. Под амплитудой мы

здесь считали суммарную площадь АО. Существование широты θ_{cr} соответствует нашему предположению, полученному из моделирования SFT. АО на широтах $\theta > \theta_{cr}$ слабо сказываются на формировании крупномасштабного поля дипольного типа, поскольку вследствие переноса на высокие широты, магнитные поля положительных и отрицательных частей би-полей остаются в данном полушарии. Поскольку общий магнитный поток от всплывающих АО равен нулю, то в конечном итоге крупномасштабное поле стремится к нулю (см. рис. 2а и рис. 2b). В случае АО на низких широтах, за счет диффузии часть магнитного поля распадающихся АО может проникать через солнечный экватор (рис. 2с, рис. 2d). Поскольку центры частей АО ведущей полярности находятся ближе к экватору, то на противоположное полушарие проникают магнитные поля именно ведущей полярности. Как следствие формируется крупномасштабное магнитное поле с униполярными областями на высоких широтах противоположной полярности в различных полушариях. Считается, что именно такое крупномасштабное поле связано со следующим циклом активности. Приведенные расчеты и оценка критической широты могут использоваться для уточнения коэффициента диффузии меридиональной циркуляции.

Работа выполнена при поддержке проекта РНФ № 23-22-00165

Литература

1. *Leighton, R.B.* // *Astrophys. J.*, 1964, vol. 140, pp. 1547–1562.
2. *Caplan, R.M., Turtle, J.A., Linker, J.A., et al.* // *Bull. Am. Astron. Soc.*, 2022, vol. 54, no. 7, p. 2022n7i125p1.
3. *Tlatov A.G., Berezin I.A., Tlatova K.A.* // *Geomagnetism and Aeronomy*, 2024, Vol. 64, No. 7, pp. 182–187.