

## КИНЕМАТИЧЕСКОЕ ПРИБЛИЖЕНИЕ ПРИ РЕКОНСТРУКЦИИ ГЕЛИОСФЕРНОГО ТОКОВОГО СЛОЯ ПО СИНОПТИЧЕСКИМ КАРТАМ

А.И. Будник, Д.И. Понявин

## KINEMATICAL APPROACH IN THE HELIOSPHERIC CURRENT SHEET RECONSTRUCTION FROM SYNOPTIC MAPS

A.I. Budnik, D.I. Ponyavin

### Модель

В нашей работе использовалась сравнительно простая модель восстановления ГТС. В качестве основания токового слоя рассматривалась нейтральная линия, получаемая в результате осреднения синоптических карт и служащая своего рода границей между полями различной полярности. Как известно, на Солнце эта линия является поясом стримеров – областью низкоскоростного солнечного ветра. (Подробнее с методикой осреднения синоптических карт можно ознакомиться в работах Бажанова А.А. [4]).

Далее, задавая скорость распространения солнечного ветра и учитывая вращение Солнца из основания нейтральной линии, мы строили нейтральную поверхность в межпланетном пространстве. Таким образом, восстановление ГТС сводится к двум простым операциям: трансляции и повороту.

Динамика магнитного поля учитывалась следующим образом: бралась последовательность осредненных синоптических карт и сшивалась в одну «ленту», по которой скользит рамка шириной  $360^\circ$ . Область, выделяемая рамкой, представляет собой магнитограмму солнечной поверхности в конкретный момент, а нейтральная линия – основание гелиосферного токового слоя. Скорость передвижения рамки по набору карт соответствует скорости вращения Солнца вокруг своей оси. Данный подход позволяет иметь «свежие» данные в пределах  $\sim 13^\circ$  от правого края рамки, именно такая часть солнечной поверхности ежедневно заносится в таблицу данных синоптических карт. Именно эта узкая область и представляет наибольший интерес при прогнозировании космической погоды и для предсказания прихода геоэффективных структур солнечного ветра.

### ГТС и геоэффективные структуры

ГТС тесно связан с такими геоэффективными структурами, как корональные выбросы массы (СМЕ). В глобальном масштабе низкоскоростной солнечный ветер тесно связан с гелиосферным расширением пояса стримеров, который, в свою очередь, определяет местоположение гелиосферного токового слоя. Последние исследования показали, что именно пояс стримеров является источником большинства СМЕ. Этот факт является важным для прогнозирования космической погоды, так как, восстановив структуру ГТС в интересующей нас области, мы можем рассчитать вероятность прихода СМЕ.

В минимуме солнечной активности конфигурация магнитного поля примерно следующая: в полярных областях располагаются корональные дыры – области с открытой конфигурацией магнитных полей с противоположными полярностями в полушариях. Раз-

деляет эти области широкая полоса, которая служит основанием для пояса стримеров, в пределах которого на поверхности Солнца образуются мелкомасштабные замкнутые структуры: активные области, солнечные пятна и волокна. Эти образования тесно связаны с корональными выбросами, а факт, что СМЕ могут нарушать структуру стримера или полностью разрушать его, подтверждает, что СМЕ, как класс, тесно связаны с поясом стримеров.

### Артефакты

При использовании осредненных синоптических карт в качестве основания гелиосферного токового слоя нулевая линия будет иметь характерный разрыв, связанный с эволюцией магнитного поля на невидимой с Земли стороне Солнца. Это связано с тем, что данные на правом и левом концах синоптической карты хотя пространственно и лежат в одной области, но по времени разнесены на 27 дней (см. рис. 1)

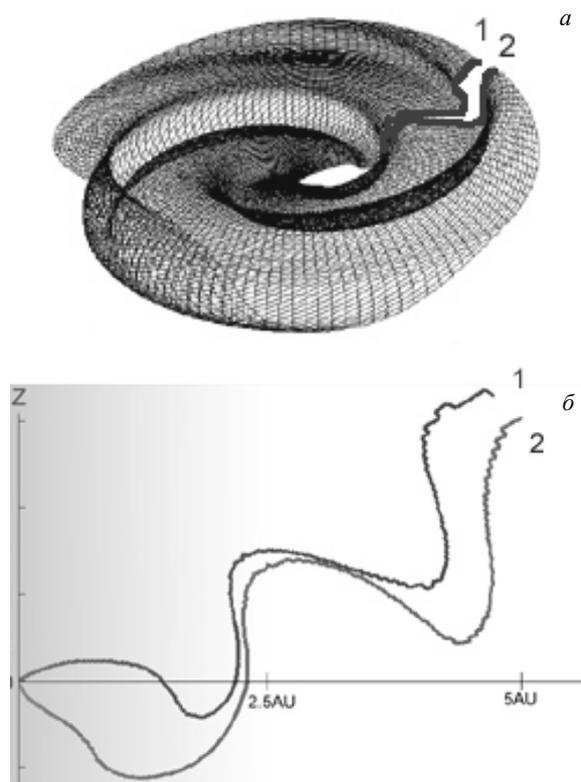


Рис. 1. Гелиосферный токовый слой (5 а. е., вид с юга), восстановленный в минимуме солнечной активности (1996–1997 гг.) с использованием осредненных синоптических карт в качестве граничных условий. Цифрами 1,2 отмечен разрыв, вызванный устареванием данных на концах синоптической карты (а); срез, демонстрирующий разрыв вдоль линий 1 и 2 (начало и конец синоптической карты) (б).

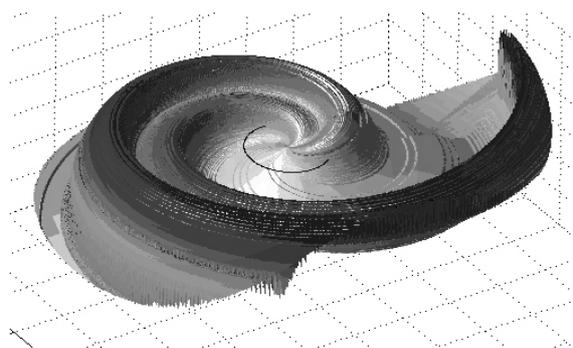


Рис. 2. Восстановленный гелиосферный токовый слой в минимуме солнечной активности, вид с юга.

### Результаты моделирования и верификация по данным космических аппаратов

На рис. 2 представлен восстановленный ГТС для максимума солнечной активности. Сравнение полученных результатов позволяет оценить сложность конфигурации магнитных полей в максимуме и сравнительную простоту в минимуме активности, когда магнитное поле на Солнце имеет квазидипольную структуру.

Верификацию моделирования мы проводили по данным спутников ACE и Ulysses. На рис. 3 представлен комбинированный график полярности ММП, полученной путем моделирования и по данным с Ulysses, а также скорость солнечного ветра, осредненная за сутки. В рассматриваемый период Солнце находилось в минимуме активности. Как раз в это время, начиная с 230 дня 1996 г., спутник пришел в область низких широт, где наблюдалась ярко выраженная секторная структура ММП. Как следует из рисунка, предложенная методика моделирования в целом отражает изменения ГТС в минимуме солнечной активности.

На рис. 4 представлен аналогичный комбинированный график для периода с 1 января по 31 декабря 1999 г. Положение Ulysses в обозначенный период времени показано на рис. 6, а.

На рис. 5 представлен еще один комбинированный график для периода с 1 января по 31 декабря 2000 г. Положение Ulysses в обозначенный период времени показано на рис. 6, б. В максимуме активности топология ГТС намного более сложная и предложенная модель, как видно из приведенных графиков, оказывается неспособной отразить всю динамику изменения ММП. Данный факт требует более глубокого изучения, так как необходимо понять факторы, влияющие на точность восстанавливаемой поверхности. На данный момент можно сделать два предположения. Во-первых, так как входными параметрами нашей модели служит конфигурация нейтральной линии и скорость солнечного ветра, то причиной ошибок могут служить оба этих фактора. Во-вторых, в модели не учитываются

плазменные взаимодействия, которые могут вносить значительный вклад в конфигурацию ГТС.

### Обсуждение

Для более детальной оценки качества модели мы заимствовали технику, используемую синоптиками для предсказания погоды, – так называемые таблицы случайных событий (contingency tables), см. рис. 7. Аналогичная методика также широко используется при анализе моделей геоэффективности СМЕ в работах [6–8].

По имеющимся экспериментальным и модельным данным рассчитываются следующие параметры:

- $FAR=b/(a+b)$  – ложное предсказание (False Alarm Ratio);
- $POD=a/(a+c)$  – вероятность зарегистрировать событие (Probability of Detection).

Параметр FAR дает нам понять, насколько модель склонна давать ложные предсказания. В нашем случае – ложное пересечение секторной границы. POD оценивает способность модели предсказывать пересечение ГТС.

При оценке модели использовался временной коридор в два дня, т. е. для событий, попавших в данный интервал времени и отраженных моделью, предсказание считалось верным. Ниже на рис. 8 приведены результаты верификации модели для максимума и минимума солнечной активности. Очевидно, что, несмотря на то, что в минимуме активности модель в целом отражает характер изменения ММП, в качестве опорных модельные данные использовать пока рано, так как количество верных предсказаний всего 59 %, FAR 0.22, POD 0.72. Данный факт, скорее всего, вызван не столько приближениями, используемыми в модели (постоянная скорость солнечного ветра, отсутствие плазменных взаимодействий), сколько несовершенством входных данных, что уже отмечалось ранее. Почему так? Просто, согласно данным околоземных спутников и данным Ulysses, на орбите последнего ускоренным распространением солнечного ветра (из-за активного взаимодействия вплоть до орбиты Земли) можно пренебречь. Скоростные градиенты на расстояниях 3–5 а. е. намного меньше, чем измеряемые околоземными аппаратами.

В максимуме активности из-за еще более сложной конфигурации ММП модель работает хуже (см. рис. 9). Здесь FAR 0.27, POD 0.49, а количество верных предсказаний падает до 38 %. Небольшое изменение параметра FAR, резкое падение POD и количества верных предсказаний связаны с тем, что модель недооценивает сложность структуры и пропускает большинство переходов секторных структур аппаратом Ulysses.

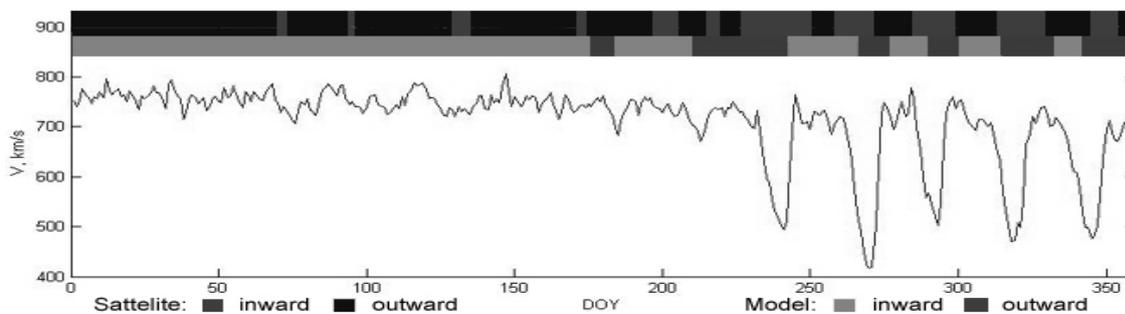


Рис. 3. (сверху вниз). Результаты измерения полярности ММП с помощью аппарата Ulysses (темный – от Солнца, светлый – к Солнцу), изменение полярности согласно нашей модели (светлый – от Солнца, темный – к Солнцу) и скорость солнечного ветра, регистрируемая Ulysses. Период времени с 1 января 1996 г. по 31 декабря 1996 г.

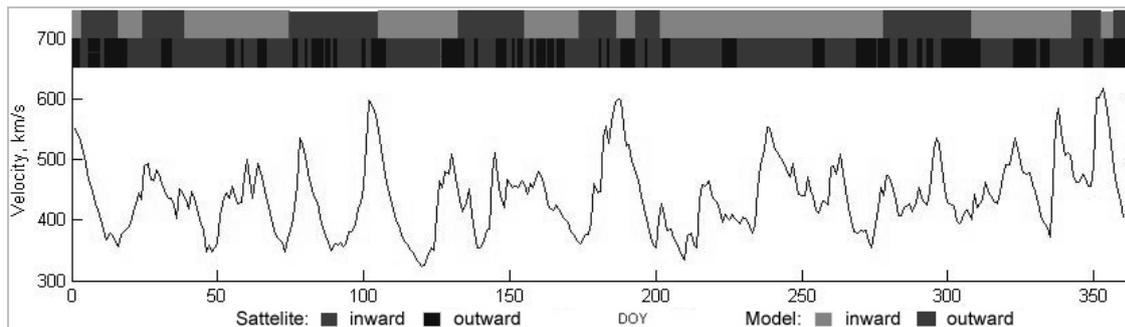


Рис. 4. (сверху вниз). Изменение полярности согласно нашей модели (светлый – от Солнца, темный – к Солнцу) и скорость солнечного ветра, результаты измерения полярности ММП с помощью аппарата Ulysses (темный – от Солнца, светлый – к Солнцу) и скорость солнечного ветра, регистрируемая Ulysses. Период времени с 1 января 1999 г. по 31 декабря 1999 г.

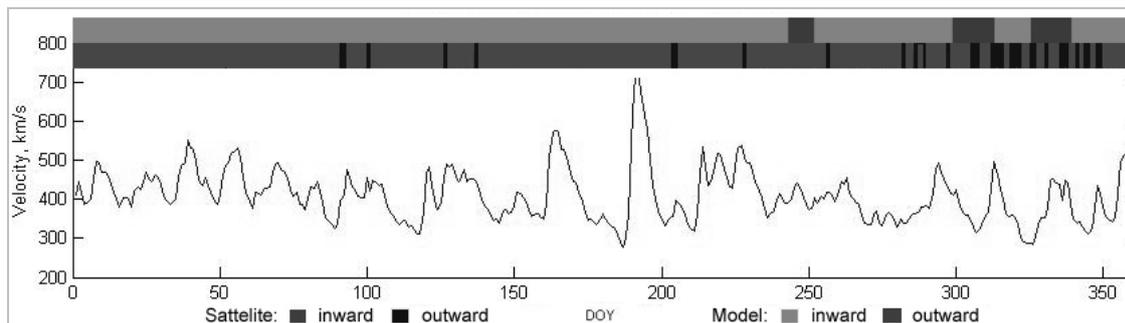


Рис. 5. (сверху вниз). Изменение полярности согласно нашей модели (светлый – от Солнца, темный – к Солнцу) и скорость солнечного ветра, результаты измерения полярности ММП с помощью аппарата Ulysses (темный – от Солнца, светлый – к Солнцу) и скорость солнечного ветра, регистрируемая Ulysses. Период времени с 1 января 2000 г. по 31 декабря 2000 г.

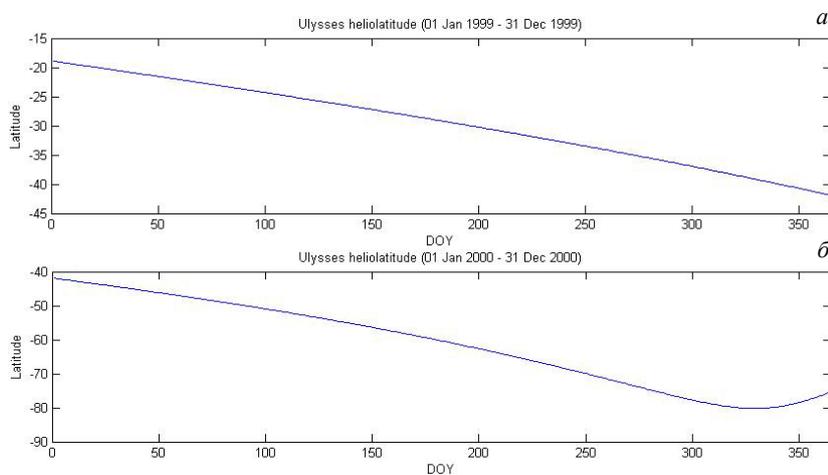


Рис. 6. Гелиоширота на которой находится аппарат Ulysses в период с 1 января 1999 г. по 31 декабря 1999 г. – а; то же для периода с 1 января 2000 г. по 31 декабря 2000 г. – б.

Prediction	Experiment		Total
	Yes	No	
Yes	a	b	a+b
No	c	d	c+d
Total	a+c	b+d	a+b+c+d

Рис. 7. Общий вид таблицы случайных событий, устанавливающей связь между экспериментальными данными и предсказанными событиями.

Prediction	Observation		Total
	Yes	No	
Yes	68	21	89
No	26	0	26
Total	94	21	115

Рис. 8. Таблица случайных событий для минимума активности Солнца.

Prediction	Observation		Total
	Yes	No	
Yes	87	48	135
No	89	0	89
Total	176	48	224

Рис. 9. Таблица случайных событий для максимума активности Солнца.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ness N.F., Wilcox J.M. Solar origin of interplanetary magnetic field // Phys. Rev. Lett. 1964. V. 13, N 15. P. 461–464.

2. Riley P., Linker J.A., Mikic Z. Modeling the heliospheric current sheet: Solar cycle variations // J. Geophys. Res. 2002. V. 107, N A7. 10.1029/2001JA000299,

3. Бажанов А.А., Понявин Д.И. Эволюция магнитного поля на Солнце // В печати.

4. Hitula T., Mursula K. Long dance of the bashful ballerina // Geophys. Res. Lett. 2006. V. 33. L03105, doi:10.1029/2005GL025198,

5. Понявин Д.И. Квазимонопольное поведение магнитного поля Солнца, видимого как звезда // Солнечная активность и космические лучи после смены знака полярного магнитного поля Солнца: Труды международной конференции, 17–22 июня 2002 г., ГАО, Пулковое. Санкт-Петербург, 2002. С. 477–484.

6. Kim R.-S., Cho K.-S., Moon Y.-J., et. al. Forecast evaluation of the coronal mass ejection (CME) geoeffectiveness using halo CMEs from 1997 to 2003 // J. Geophys. Res. 2005. V 110. A11104. doi:10.1029/2005JA011218.

7. Kang S.-M., Moon Y.-J., Cho K.-S., et. al. Coronal mass ejection geoeffectiveness depending on field orientation and interplanetary coronal mass ejection classification // J. Geophys. Res. 2006. V. 111. A05102. doi:10.1029/2005JA011445.

8. McKenna-Lawor, Drayer M., Kartalev M.D., et. al. Near real-time predictions of the arrival at Earth of flare-related shocks during Solar Cycle 23 // J. Geophys. Res. 2006. V. 111. A11103. doi:10.1029/2005JA011162.

9. Будник А.И., Понявин Д.И. Реконструкция гелиосферного токового слоя // Труды X Пулковской Международной конференции по физике Солнца, 6–8 сентября 2006 г., ГАО, Пулковое. Санкт-Петербург, 2006. С. 183–188.

Институт физики, Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург