
МГД-МОДЕЛИРОВАНИЕ КОРОТИРУЮЩИХ ОБЛАСТЕЙ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В ГЕЛИОСФЕРЕ С РАЗНЫМИ ГРАНИЧНЫМИ УСЛОВИЯМИ И РАЗНЫМИ ПРОГРАММНЫМИ ПАКЕТАМИ

MHD-SIMULATION OF COROTATING INTERACTION REGIONS IN THE HELIOSPHERE USING DIFFERENT BOUNDARY CONDITIONS AND CODES

Д.А. Павлов

Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет «ЛЭТИ»,
Санкт-Петербург, Россия, dapavlov@etu.ru
Санкт-Петербургский государственный университет,
Санкт-Петербург, Россия

М.Б. Крайнев

Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН,
Москва, Россия, mkraïnev46@mail.ru

М.С. Калинин

Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН,
Москва, Россия, kalininms@lebedev.ru

А.В. Кодуков

Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет «ЛЭТИ»,
Санкт-Петербург, Россия, akodukovich@mail.ru

Си Ло

Шаньдунский институт передовых технологий,
Цзинань, Шаньдун, Китай, xi.luo@iat.cn

Фан Шэнь

Государственная ключевая лаборатория космической
погоды Национального центра космических наук КАН,
Пекин, Китай, fshen@spaceweather.ac.cn

Юйцзи Чжу

Шаньдунский институт передовых технологий,
Цзинань, Шаньдун, Китай, yjzhu@spaceweather.ac.cn

D.A. Pavlov

St. Petersburg State Electrotechnical University “LETI”,
St. Petersburg, Russia, dapavlov@etu.ru
St. Petersburg State University,
St. Petersburg, Russia

M.B. Krainev

Lebedev Physical Institute RAS,
Moscow, Russia, mkraïnev46@mail.ru

M.S. Kalinin

Lebedev Physical Institute RAS,
Moscow, Russia, kalininms@lebedev.ru

A.V. Kodukov

St. Petersburg State Electrotechnical University “LETI”,
St. Petersburg, Russia, akodukovich@mail.ru

Xi Luo

Shandong Institute of Advanced Technology,
Jinan, Shandong, China, xi.luo@iat.cn

Fang Shen

State Key Laboratory of Space Weather,
National Space Science Center CAS,
Beijing, China, fshen@spaceweather.ac.cn

Yuji Zhu

Shandong Institute of Advanced Technology,
Jinan, Shandong, China, yjzhu@spaceweather.ac.cn

Аннотация. Представлены результаты МГД-моделирования коротирующих областей взаимодействия (КОВ) на расстояниях от Солнца от 0.1 а.е. (внутренняя граница) до значительно больших расстояний (20–30 а.е.) в двух вариантах, в которых магнитное поле на фотосфере (1) определяется из детальной синоптической карты и (2) представлено лишь дипольной составляющей. Расчеты проведены применительно к кэррингтоновскому обороту (КО) 2066 (январь–февраль 2008 г.) с использованием двух независимых пакетов программ российской и китайской групп. Исследуемый период времени характеризуется наличием долгоживущих корональных дыр на Солнце и устойчивой рекуррентной вариацией в характеристиках гелиосферы, а также в интенсивности галактических космических лучей.

Обсуждаются преимущества и недостатки моделирования КОВ с помощью детальной и дипольной моделей фотосферного магнитного поля, а также с использованием для этой цели двух упомянутых пакетов программ. Проведено сравнение механизмов образования и эволюции КОВ с расстоянием в двух

Abstract. The paper presents the results of MHD modeling of corotating interaction regions (CIRs) at distances of 0.1 AU from the Sun (inner boundary) to much larger distances (20–30 AU) in two variants in which the magnetic field on the photosphere (1) is determined from a detailed synoptic map and (2) is represented only by the dipole component. The calculations are made for Carrington rotation 2066 (January–February 2008), using two independent software packages of Russian and Chinese groups. The time period under study is characterized by the presence of long-lived coronal holes on the Sun and a stable recurrent variation in heliosphere characteristics, as well as in the intensity of galactic cosmic rays.

We discuss the advantages and disadvantages of modeling CIRs by detailed and dipole models of the photospheric magnetic field, as well as with the two mentioned software packages. The mechanisms of formation and evolution of CIRs with distance in the two models are compared and correlated to the conclusions of our previous works.

моделях и сопоставление с выводами наших предыдущих работ.

Ключевые слова: гелиосфера, коротирующие области взаимодействия (КОВ), МГД-моделирование КОВ, детальная и дипольная модели КОВ.

ВВЕДЕНИЕ

Коротирующие области взаимодействия (КОВ) представляют собой крупномасштабные структуры в солнечном ветре (СВ), возникающие при взаимодействии более быстрых потоков, исходящих из корональных дыр, с медленными потоками, связанными с экваториальными шлемовидными структурами. Это взаимодействие приводит к накоплению плазмы, возникновению стоячих ударных волн, сильным градиентам плотности, скорости и напряженности межпланетного магнитного поля. Типично КОВ включают ведущий фронт сжатия, область повышенной турбулентности, возможные обратные фронты и, как правило, пересекают гелиосферный токовый слой (ГТС). Благодаря вращению Солнца такие структуры носят рекуррентный характер и наблюдаются с периодом ~ 27 сут. Их значимость выходит за рамки локальных околоземных проявлений: КОВ существенно влияют на распространение и модуляцию как галактических (ГКЛ), так и солнечных (СКЛ) космических лучей, а также на формирование структуры гелиосферы на расстояниях до нескольких десятков астрономических единиц [Gosling, Pizzo, 1999; Potgieter, 2013]. Это делает моделирование КОВ важным направлением в гелиофизике, особенно в задачах, связанных с прогнозированием космической погоды и модуляцией частиц.

Коротирующие области взаимодействия исследуются уже более пятидесяти лет [Belcher, Davis, 1971; Richardson, 2018]. Накоплен значительный объем наблюдений, в основном в районе орбиты Земли, но также (эпизодически) до больших гелиографических широт [Forsyth, Gosling, 2001] и расстояний [Hundhausen, Gosling, 1976; Burlaga et al., 1984]. Вскоре после обнаружения КОВ и связи высокоскоростных потоков СВ с корональными дырами, а низкоскоростных — с областями шлемовидных структур в короне, на вершины которых проецируется гелиосферный токовый слой, были разработаны МГД-модели КОВ, включающие образование контактной поверхности, стоячих ударных волн, изменение структуры в пространстве и т. д. [Pizzo, Gosling, 1994; Gosling, Pizzo, 1999]. Этим расчетам посвящено много работ, однако в основном они направлены на прогноз околоземных характеристик гелиосферы и ограничиваются небольшими расстояниями от Солнца (в пределах $r=1\div 2$ а.е.) [<http://www.swpc.noaa.gov/products/wsa-enlil-solar-wind-prediction>; <http://solarwind.entoforce.ru>; Арутюнян и др., 2023].

Однако, кроме их важности для задания параметров космической погоды у Земли, КОВ представляют собой отдельное явление и, по-видимому, существенно влияют на характеристики гелиосферы

Keywords: heliosphere, corotating interaction regions (CIRs), MHD simulation of CIRs, detailed and dipole CIR models.

в основном ее объеме (вне орбиты Земли) [Крайнев и др., 2023]. Из-за очень редкого присутствия в этом объеме космических аппаратов особую значимость для изучения КОВ может иметь интерпретация связанных с КОВ вариаций интенсивности ГКЛ, которые, даже когда регистрируются у Земли, по пути к ней проходят как внутри КОВ, так и по средней и дальней гелиосфере.

Поскольку для моделирования вариаций интенсивности ГКЛ, связанных с КОВ, надо сначала построить модель гелиосферы с учетом КОВ, причем до больших расстояний, такое двухступенчатое моделирование (гелиосферных характеристик в МГД-приближении, а затем, по полученным результатам, интенсивности ГКЛ) было проведено в ряде работ [Wiengarten et al., 2014; Kopp et al., 2017; Guo, Florinski, 2014, 2016; Luo et al., 2020, 2023, 2024]. При этом подходы к решению указанной задачи и полученные результаты в некоторых аспектах существенно различаются.

В данной статье, так же как в работах [Крайнев и др., 2023; Калинин и др., 2023, 2024], мы анализируем результаты и развиваем подходы, используемые в работах [Luo et al., 2020, 2023, 2024]. Мы обсудим два подхода к МГД-моделированию КОВ и результаты этого моделирования двумя научными группами. В разделе 1 формулируются и анализируются система МГД-уравнений, процедура задания граничных условий на внутренней границе, выбирается период для моделирования КОВ, рассмотрены преимущества и недостатки выбора двух моделей фотосферного магнитного поля и обсуждаются результаты моделирования КОВ по этим моделям с использованием пакета программ российской группы. В разделе 2 излагаются результаты аналогичного моделирования КОВ для того же периода, проведенного китайской группой. При изложении результатов моделирования КОВ мы рассматриваем только две векторные гелиосферные характеристики: скорость СВ и гелиосферное магнитное поле (ГМП), которые важны для распространения космических лучей. Наконец, в разделе 3 обсуждаются результаты предшествующих разделов и приводятся выводы.

1. МГД-МОДЕЛИРОВАНИЕ КОВ РОССИЙСКОЙ ГРУППОЙ

1.1. Выбор периода и моделей фотосферного магнитного поля

Сначала сформулируем некоторые выводы исходя из смысла обсуждаемых явлений. Строго говоря, термины «коротирующие области взаимодействия» и «рекуррентные изменения характеристик» означают, что КОВ вращаются вместе с Солнцем, а временные

профили гелиосферных характеристик и интенсивности ГКЛ (при наблюдениях с Земли) повторяют друг друга для последовательных оборотов Солнца. Это значит, что во вращающейся с Солнцем системе координат распределения как гелиосферных характеристик, так и интенсивности ГКЛ являются стационарными. Строгого повторения для последовательных оборотов в наблюдениях характеристик как гелиосферы, так и ГКЛ, нет. Но в качестве первого приближения к этому требованию можно использовать их распределения по долготе, усредненные по нескольким оборотам Солнца. Таким образом, для МГД-моделирования до $r=r_{\text{MHD}}$ желательно использовать граничные условия на внутренней границе гелиосферы ($r_{\text{in}} \approx 0.1$ а.е.), усредненные примерно по $K=r_{\text{MHD}}/\Delta r$ оборотам Солнца, где $\Delta r = 6$ а.е. — слой, который проходит СВ средней скорости за один оборот Солнца, а результаты расчета сравнить с усредненными за этот период результатами наблюдений.

Расчеты проведены применительно к КО2066 (25.01–21.02.2008). Исследуемый период времени характеризуется наличием долгоживущих корональных дыр на Солнце и устойчивой рекуррентной вариацией в характеристиках гелиосферы, а также в интенсивности ГКЛ [Modzelewska et al., 2020].

В качестве источника карт фотосферного магнитного поля был выбран каталог обсерватории Уилкокса (Wilcox Solar Observatory, WSO), в котором предоставляются решения уравнений потенциального поля от фотосферы до поверхности источника $2.5R_s$ (Potential Field Source Surface, PFSS [Schatten et al., 1969]), в том числе для средних условий каррингтоновских периодов [<http://wso.stanford.edu/Harmonic.los/ghlist.html>]. Здесь и далее R_s обозначает радиус фотосферы. Решения представлены в форме коэффициентов присоединенных многочленов Лежандра [<http://wso.stanford.edu/words/pfss.pdf>] до 9-й степени и 9-го порядка включительно, что позволяет легко выбирать детализацию используемой модели фотосферного магнитного поля по максимальной степени. В данной работе использованы две модели: с гармониками до 8-й степени ($l_{\text{max}}=8$) и до 1-й степени ($l_{\text{max}}=1$). Первая модель по детализации магнитных полей на фотосфере ближе к реальным условиям для конкретного оборота Солнца, но многие из этих деталей по нашим представлениям являются сравнительно короткоживущими и должны нивелироваться при усреднении за несколько оборотов. Вторая модель представляет магнитное поле в виде наклонного диполя, т. е. при полном отсутствии указанных деталей. Отметим, что модель наклонного диполя широко используется для задания формы гелиосферного токового слоя при моделировании вариаций интенсивности ГКЛ [Potgieter, 2013], а также для исследования влияния КОВ на временной профиль интенсивности СКЛ [Zhu et al., 2024]. В настоящей работе модель наклонного диполя использовалась прежде всего для верификации результатов расчетов, выполненных с применением более детализированной модели фотосферного магнитного поля, а также для выявления и анализа закономерностей формирования и пространствен-

но-временной эволюции КОВ. Благодаря своей простоте и регулярности модель наклонного диполя позволяет выделить основные черты поведения гелиосферных параметров и тем самым служит своеобразным эталоном при интерпретации результатов, полученных в более сложных моделях.

1.2. Уравнения и технические параметры МГД-симуляции

Межпланетная плазма в данной работе моделируется с помощью «идеальных» МГД-уравнений, т. е. не содержащих диффузии и резистивности:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{m} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \mathbf{m}}{\partial t} + \nabla \cdot \left[\mathbf{m} \mathbf{v}^T - \mathbf{B} \mathbf{B}^T + I \left(p + \frac{B^2}{2} \right) \right]^T = \rho \mathbf{g} - 2\mathbf{\Omega} \times \mathbf{m} - \rho \mathbf{\Omega} \times (\mathbf{\Omega} \times \mathbf{r}), \quad (2)$$

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} - \nabla \times (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) = 0, \quad (3)$$

$$\frac{\partial E_t}{\partial t} + \nabla \cdot \left[\left(\frac{\rho v^2}{2} + p \frac{\gamma}{\gamma-1} \right) \mathbf{v} - (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \times \mathbf{B} \right] = \mathbf{m} \cdot (\mathbf{g} - \mathbf{\Omega} \times (\mathbf{\Omega} \times \mathbf{r})), \quad (4)$$

$$E_t = \frac{\rho}{\gamma-1} + \frac{m^2}{2\rho} + \frac{B^2}{2}, \quad (5)$$

где ρ — плотность протонов; \mathbf{v} — скорость; $\mathbf{m} = \rho \mathbf{v}$ — импульс массы единичного объема; p — давление; \mathbf{B} — напряженность магнитного поля; \mathbf{g} — ускорение свободного падения; $\mathbf{\Omega}$ — угловая скорость вращения системы координат. Температура T не входит непосредственно в уравнения, но связана с плотностью и давлением уравнением состояния $p = k\rho T / (m_u \mu)$, где k — постоянная Больцмана; m_u — атомная единица массы; $\mu = 0.616$ — средняя молярная масса частиц; $\gamma = 1.5$ — показатель адиабаты. Магнитная постоянная μ_0 отсутствует в (2), так как $\mu_0 = 1$ в выбранной системе единиц измерения.

Общий подход к МГД-моделированию приведен в [Арутюнян и др., 2023]. Для моделирования используется пакет PLUTO [Mignone et al., 2007] и реализованная в нем численная схема, основанная на решении задачи Римана методом Хартена — Лакса — ван Леера (Harten, Lax, van Leer; HLL).

Сетка симуляции имеет следующие размеры и разбиение:

- по радиальной координате: от 0.1 до 20 а.е., 2100 ячеек ($l_{\text{max}}=1$) или до 7 а.е., 1200 ячеек ($l_{\text{max}}=8$);
- по кошироте: от 0 до 180° , 180 ячеек;
- по долготе: от 0 до 360° , 360 ячеек.

Разбиение по долготе и широте равномерное, во время как по радиальной координате — логарифмическое, описываемое законом

$$r_{i+1} = r_i \left(\frac{r_{\text{MHD}}}{r_{\text{in}}} \right)^{1/N}, \quad (6)$$

где r_i — узел сетки ($i=0 \dots N$); $r_{\text{in}} = 21.5R_s$ и $r_{\text{MHD}} = r_N$ — внутренняя (0.1 а.е.) и внешняя границы КОВ.

PLUTO имеет встроенную поддержку граничных условий по долготе и широте: “periodic” и “polaraxis” соответственно. На внешней границе по радиальной координате установлено граничное условие вытекания (outflow). Условия на внутренней границе описаны в разделе 1.5.

Стационарная (вращающаяся вместе с Солнцем) система координат также доступна в средствах моделирования PLUTO. Вращение системы координат задано с периодом 24.47 сут (период вращения Солнца на экваторе). Таким образом, поверхность Солнца в этой системе координат неподвижна, а граничные условия на внутренней границе области симуляции постоянны. Соответствующие члены ускорения Кориолиса и центробежного ускорения добавляются в уравнения МГД.

1.3. Карта B_r на фотосфере

Решение уравнений потенциального поля для радиальной составляющей, предоставляемое WSO, выглядит следующим образом [<http://wso.stanford.edu/words/pfss.pdf>]:

$$B_r(r, \theta, \phi) = \sum_{lm} \overline{P_l^m}(\cos \theta) (g'_{lm} \cos(m\phi) + h'_{lm} \sin(m\phi)) \times \left[(l+1) \left(\frac{R_s}{r} \right)^{l+2} + l \left(\frac{r}{R_{ss}} \right)^{l-1} \left(\frac{R_s}{R_{ss}} \right)^{l+2} \right],$$

где g'_{lm} и h'_{lm} — коэффициенты, предоставляемые WSO (в частности, в [<http://wso.stanford.edu/Harmonic.los/CR2066>] даны коэффициенты для КО2066); l, m — степень и порядок присоединенного многочлена Лежандра соответственно; $R_{ss} = 2.5R_s$ — радиус поверхности источника. Коэффициент g'_{00} (монополю) в расчет не принимается.

Отметим, что нормировка присоединенных многочленов Лежандра в WSO следующая:

$$\int_{-1}^1 (\overline{P_l^m}(x))^2 dx = \frac{2}{2l+1} (2 - \delta_{m0}),$$

что отличается от общепринятой нормировки

$$\int_{-1}^1 (P_l^m(x))^2 dx = \frac{2(l+m)!}{(2l+1)(l-m)!}.$$

Таким образом, присоединенные многочлены Лежандра, используемые в WSO, вычисляются из общепринятых с помощью соотношения

$$\overline{P_l^m}(x) = (-1)^m \sqrt{\frac{(l-m)!}{(l+m)!}} (2 - \delta_{m0}) P_l^m(x).$$

Несмотря на то, что решение WSO доступно, в том числе на поверхности источника ($r = R_{ss}$), в настоящей работе используется карта WSO на фотосфере ($r = R_s$), а дальнейшие вычисления, включая вычисления по модели PFSS, проводятся другими средствами.

1.4. Построение трехмерной карты магнитного поля в солнечной короне

Модель PFSS, являющаяся допустимым упрощением модели магнитного поля Солнца до $2.5R_s$

[Hoeksema, 1984; Riley et al., 2006], имеет множество реализаций, как аналитических, так и численных. В аналитических реализациях решение уравнения Лапласа получается путем вычисления коэффициентов сферических гармоник, в то время как в численных реализациях решение строится в виде карты на некоторой дискретной сетке. В данной работе в связи с необходимостью трассировки линий поля был избран второй подход, реализованный в пакете POT3D [<https://github.com/predsci/POT3D>] с помощью метода конечных элементов.

На большем удалении от Солнца предположение о потенциальности не действует и для моделирования магнитного поля между $2.5R_s$ и $21.5R_s$ (0.1 а.е.) применяется модель Шаттена (Schatten Current Sheet, SCS [Schatten, 1971]), в которой допускаются токи между областями противоположной полярности магнитного поля. В рамках модели используется следующее предположение: начиная с $2.5R_s$ силовые линии более не замыкаются на фотосферу. В связи с этим значение B_r устанавливается положительным (исходящим) во всех областях, даже в тех, где PFSS была установлена отрицательная полярность. Для расчета модели SCS используется уже упомянутый пакет POT3D.

1.5. Трассировка линий поля и вычисление карты V_r на внутренней границе гелиосферы

Радиальная компонента скорости СВ на поверхности источника $2.5R_s$ задается эмпирической моделью WSA (Wang—Sheeley—Arge [Wang, Sheeley, 1990; Arge, Pizzo, 2000])

$$V_r(2.5, \theta_{2.5}, \phi_{2.5}) = 285 + \frac{625}{(1 + f_s)^{2/9}} \times (1 - 0.8 \exp(-(\theta_b/2)^2))^3 \text{ км/с},$$

где $f_s = \left(\frac{1}{2.5} \right)^2 \frac{B_r(2.5, \theta_{2.5}, \phi_{2.5})}{B_r(1, \theta_1, \phi_1)}$ — коэффициент

расширения магнитных трубок открытых линий магнитного поля между фотосферой и поверхностью источника, а θ_b — угловое расстояние (в град) от нижней точки линии поля (θ_b, ϕ) до границы корональной дыры. Таким образом, величина θ_b , определенная на фотосфере, отображается на поверхность источника с помощью трассировки линий поля. Аналогично с помощью трассировки линий поля от $21.5R_s$ до $2.5R_s$ получается отображение карты V_r , построенной на поверхности источника, на внешнюю границу поля симуляции. Трассировка проводится три раза с помощью пакета streamtracer [<https://github.com/sunpy/streamtracer>]:

1. Вниз от $21.5R_s$ до $2.5R_s$ в трехмерной карте магнитного поля, рассчитанной по модели SCS. Начальными точками выбираются центры ячеек равномерной сетки долгот и широт ($\theta_{21.5}, \phi_{21.5}$).

2. Вниз от $2.5R_s$ до $1R_s$ в трехмерной карте магнитного поля, рассчитанной по модели PFSS. Начальными точками являются концы линий, полученных на предыдущем этапе, ($\theta_{2.5}, \phi_{2.5}$). Ячейки равномерной сетки широт и долгот на фотосфере,

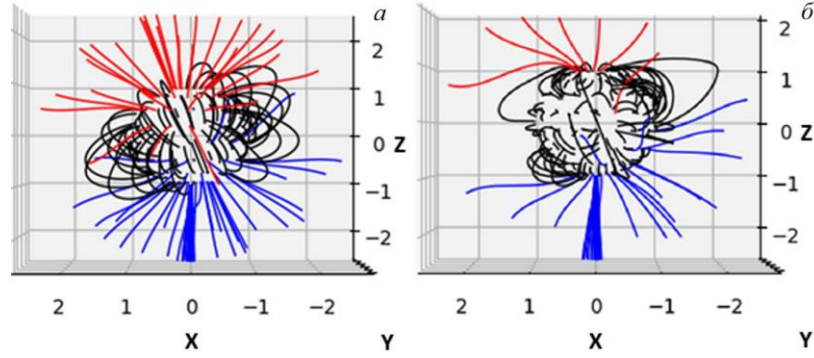


Рис. 1. Результаты трассировки линий магнитного поля от $1R_s$ до $2.5R_s$ для модели WSO с $L_{\max}=1$ (а) и с $L_{\max}=8$ (б). Красные линии — открытые линии с $B_r < 0$, синие — с $B_r > 0$, черные — замкнутые линии

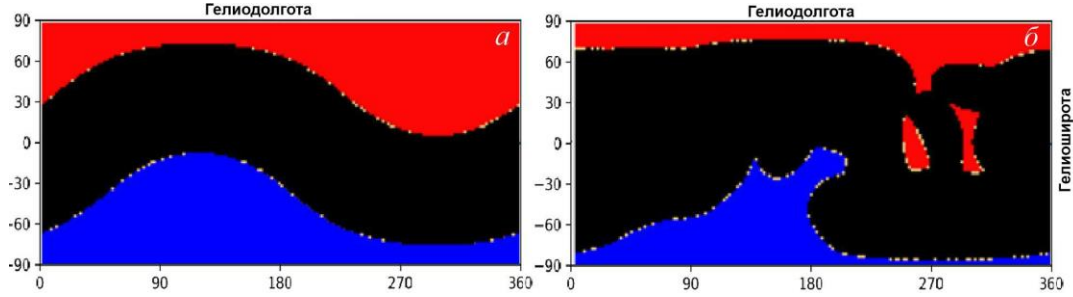


Рис. 2. Полярность линий магнитного поля: а — $L_{\max}=1$; б — $L_{\max}=8$. Красная заливка — отрицательные открытые линии, синяя — положительные открытые, черная — замкнутые, желтый — ошибочно определенные замкнутые, скорректированные при трассировке вверх

в которых оказались концы линий, помечаются как участки корональных дыр. Полагается, что все линии, достигшие поверхности источника, являются открытыми [Wang, Sheeley, 1990].

3. Вверх от $1R_s$ до $2.5R_s$ (рис. 1) в трехмерной карте магнитного поля, рассчитанной по модели PFSS. Начальными точками являются центры ячеек равномерной сетки долгот и широт, не считавшихся корональными дырами по результатам трассировки 2. В случае, когда линия достигла поверхности источника, ячейка также помечается как участок корональной дыры (рис. 2, 3).

1.6. Граничные и начальные условия в гелиосфере

На внутренней границе поля МГД-симуляции ($r_{\text{in}}=0.1$ а.е.) требуется задать карты двух векторных величин (\mathbf{B} , \mathbf{V}) и двух скалярных величин (числовая плотность частиц D , давление p). Задаются следующие значения: V_r (см. раздел 1.5), $V_\phi = V_\theta = 0$, $|B_r| = 4.5 \cdot 10^{-7}$ Тл. Полярность в каждой ячейке сетки равна полярности в конце линии поля, трассированной от $21.5R_s$ до поверхности источника [Nikolic, 2017] (см. раздел 1.5):

$$B_\phi = -B_r \sin \theta \sin 2\pi 21.5R_s / V_r, \quad B_\theta = 0,$$

$$D = D_{\text{fast}} V_{\text{fast}} / V_r, \quad p = k D_{\text{fast}} T_{\text{fast}} / (m_u \mu).$$

Было принято значение $V_{\text{fast}} = 750$ км/с, используемое в модели прогноза СВ Центра предсказания космической погоды (Solar Weather Prediction Center, SWPC). Величина B_r , а также значения $D_{\text{fast}} = 400 \text{ см}^{-3}$, $T_{\text{fast}} = 1.5 \cdot 10^6$ К близки по порядку к измеренным в течение КО2066 значениям (с уче-

том экстраполяции от 1 до 0.1 а.е.). Начальные условия на трехмерном поле МГД-симуляции были заданы следующим образом:

$$V_r(r, \theta, \phi) = V_r(r_{\text{in}}, \theta, \phi), \quad (7)$$

$$V_\phi(r, \theta, \phi) = -\Omega r_{\text{in}} \sin(\theta), \quad (8)$$

$$V_\theta(r, \theta, \phi) = 0, \quad (9)$$

$$B_r(r, \theta, \phi) = B_r(r_{\text{in}}, \theta, \phi_0) \left(\frac{r_{\text{in}}}{r} \right)^2, \quad (10)$$

$$B_\phi(r, \theta, \phi) = -B_r(r_{\text{in}}, \theta, \phi_0) \left(\frac{\Omega 21.5R_s}{V_r} \right) \left(\frac{r_{\text{in}}}{r} \right), \quad (11)$$

$$B_\theta(r, \theta, \phi) = 0, \quad (12)$$

$$D(r, \theta, \phi) = D(r_{\text{in}}, \theta, \phi) \left(\frac{r_{\text{in}}}{r} \right)^2, \quad (13)$$

$$p(r, \theta, \phi) = p(r_{\text{in}}, \theta, \phi_0) \left(\frac{r_{\text{in}}}{r} \right)^3, \quad (14)$$

$$\phi_0 = \phi + \frac{r - r_{\text{in}}}{V_r(r_{\text{in}}, \theta, \phi)} \Omega \sin \theta. \quad (15)$$

Данные начальные условия имеют сходство со стационарными уравнениями спиралей Паркера [Parker, 1958] и с начальными условиями, используемыми в [Wang et al., 2020; Luo et al., 2020]. Отличия данных начальных условий от указанных источников, как и различия источников между собой, не имеют принципиального значения, так как финальный результат МГД-симуляции (установившаяся стационар-

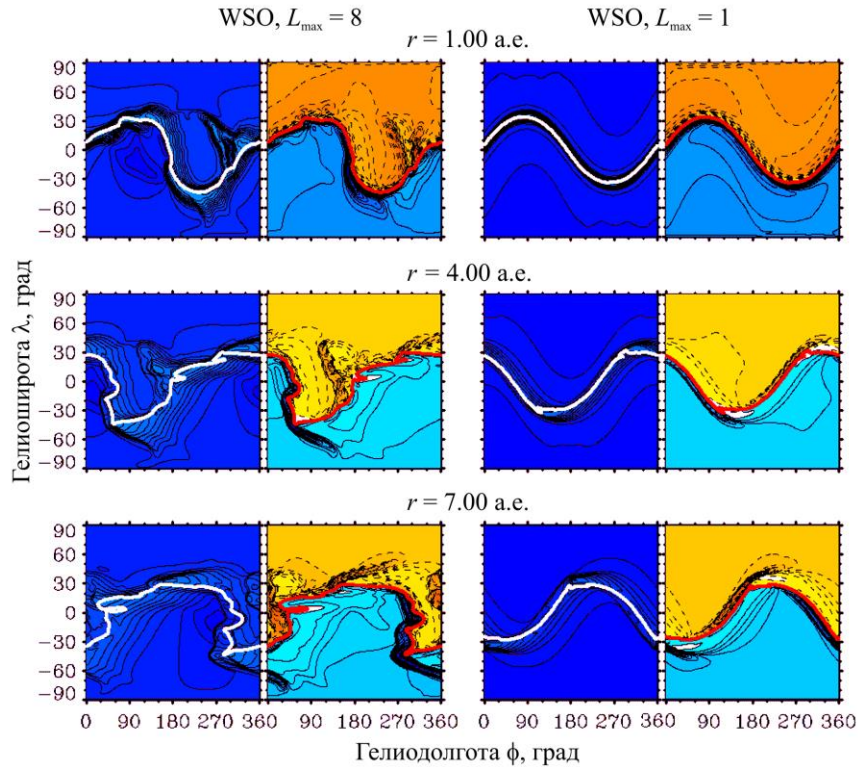


Рис. 3. Образование и эволюция с расстоянием КОВ, рассчитанной российской группой при использовании двух моделей фотосферного магнитного поля по данным WSO для КО 2066 с учетом гармоник до $L_{\max}=8$ (слева) и до $L_{\max}=1$ (справа) во внутренней гелиосфере (вверху), на расстоянии $r=4$ а. е. (в центре) и на $r=7$ а. е. (внизу). На каждой панели показаны карты радиальной компоненты скорости СВ (слева) и индукции ГМП (справа). На картах магнитного поля полусфера $B_r > 0$ отмечена оттенками синего цвета и сплошными изолиниями, а $B_r < 0$ — оттенками желтого и красного цвета и штриховыми изолиниями. Соответствие оттенка значению характеристики (не показано на рисунке) одно и то же для соответствующих карт обеих моделей. Красная линия — ГТС, разграничивающий униполярные полусферы B_r (изолинии $B_r=0$), белая — на картах V_r

ная картина) не зависит от начальных условий, которые могут влиять лишь на скорость сходимости.

1.7. Результаты МГД-моделирования

Образование и эволюция с расстоянием КОВ, рассчитанной при использовании двух моделей фотосферного магнитного поля по данным WSO для КО2066, показаны на рис. 3. Видно, что более полная модель приводит к образованию значительно большего числа областей сжатия и разряжения ГМП более сложной формы, чем для простой модели. Кроме того, в более детальной модели вариации скорости и ГМП значительно более глубоки и развиваются значительно быстрее, чем в простой модели.

Особенно сильно различие между картами для двух моделей проявляется в более значительном возмущении с расстоянием формы ГТС для детальной модели. Поскольку мы относим это возмущение к недостаткам МГД-моделирования ГТС как важной характеристики КОВ, расчеты КОВ в модели WSO с $L_{\max}=8$ на расстояниях $r > 7$ а. е. не проводились. Однако и для простой модели WSO с $L_{\max}=1$ уже на расстоянии 4 а. е. на ГТС образуются небольшие возмущения, сохранившиеся до $r=7$ а. е. Что происходит с картами B_r и V_r КОВ в простой модели на больших расстояниях, видно на рис. 4.

На рис. 3, 4 показаны образование и эволюция радиальных компонент скорости СВ и индукции ГМП. На расстояниях больше нескольких астрономических единиц направление ГМП и скорости СВ (во вращающейся с Солнцем системе координат) становится все более азимутальным, но величина V_ϕ , а также величина и полярность B_ϕ в основном определяются картами B_r и V_r в соответствии с (9).

Однако распределения полярных компонент V_θ и B_θ и их эволюция с расстоянием, показанные на рис. 5, могут быть важными характеристиками модельной КОВ. Видно, что эти распределения довольно сложны и в распределении их полярности есть компонента, довольно близко следующая за распределением полярности B_r , судя по положению линии $B_r=0$. Другая, более высокоширотная компонента V_θ указывает на поток СВ к полюсам уже с расстояний $r=10$ а. е.

2. ОБРАЗОВАНИЕ И ЭВОЛЮЦИЯ КОВ В МОДЕЛЯХ КИТАЙСКОЙ ГРУППЫ

Аналогичные МГД-моделирование КОВ для КО 2066 и других оборотов Солнца с использованием детальной модели солнечного магнитного поля (СМП) по данным GONG выполнены китайской группой

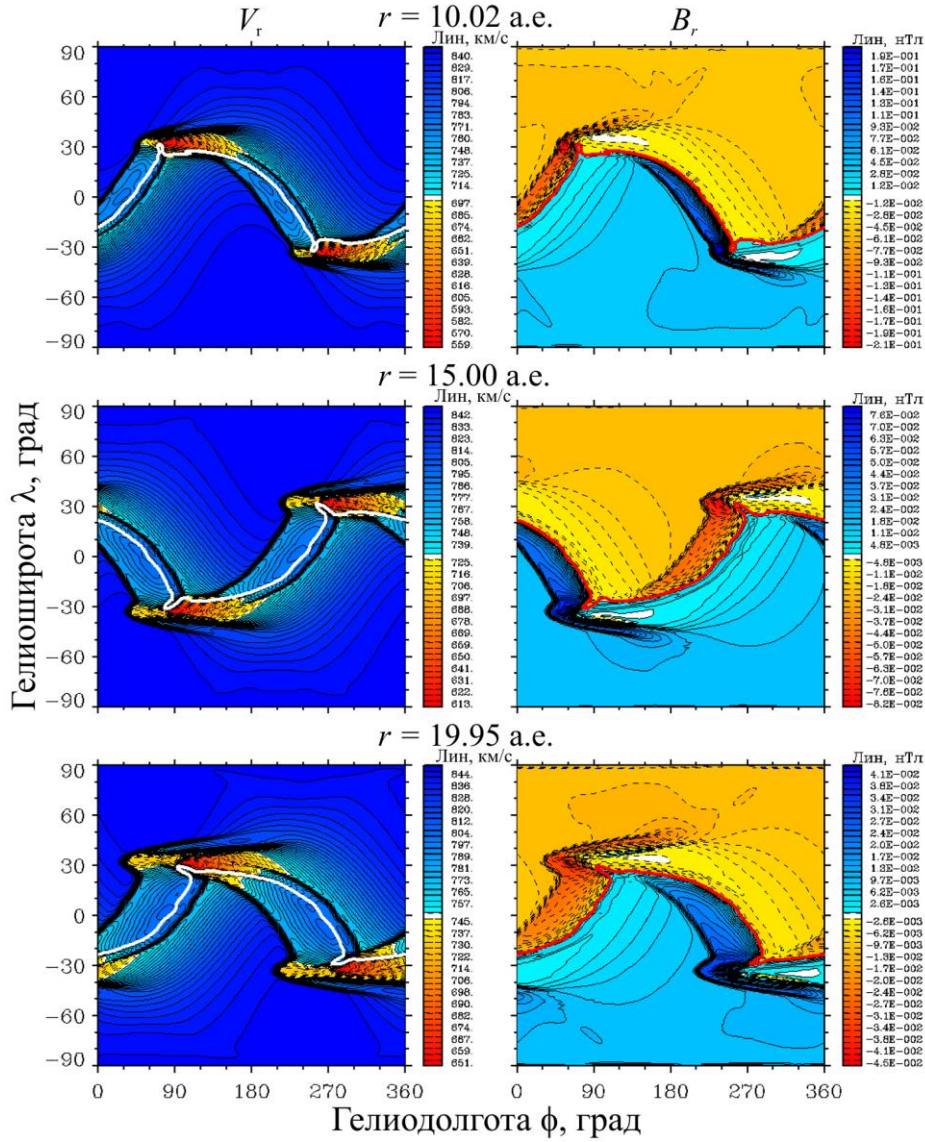


Рис. 4. Сравнение распределения радиальных компонент скорости СВ и индукции ГМП по данным WSO с $L_{\max} = 1$ на больших гелиоцентрических расстояниях, чем на рис. 3. Расположение карт на панелях, а также тип изолиний и линий ГТС тот же, что на рис. 3. Соответствие оттенка значению характеристики показано справа от каждой панели

[Luo et al., 2020, 2023, 2024] по методике, подробно описанной в работе [Shen et al., 2018]. При этом в основных чертах методика моделирования КОВ была аналогична используемой российской группой (описана в разделе 1): в качестве исходных данных для постановки граничных условий для скорости СВ использованы результаты сканирования СМП и эмпирическая методика WSA; граничные условия для других характеристик согласовывались с наблюдениями на орбите Земли; решение системы МГД-уравнений (1)–(5) проводилось во всем диапазоне полярного и азимутального углов до расстояний r_{MHD} с помощью известных численных методов. Однако были найдены некоторые расхождения с методикой, описанной в разделе 1:

- частично различаются системы МГД-уравнений, уравнение (4) в [Shen et al., 2018] описывает изменение давления, в то время как соответствующее уравнение (4) в используемой PLUTO МГД-модели описывает изменение плотности энергии;

- использование 6-компонентной сетки для устранения сингулярностей на полюсах, не полностью известна конфигурация сетки по радиусу, доступно для анализа только 88 точек;

- модель потенциального поля китайской группой реализована с помощью системы уравнений на коэффициенты сферических гармоник, в то время как российская группа использует пакет POT3D, в котором модель потенциального поля реализована с помощью метода конечных элементов;

- другие коэффициенты для модели WSA, некоторые из которых калибруются в зависимости от фазы солнечного цикла;

- набор инвариантов и свободных переменных при формировании граничных условий отличается от рассмотренных в разделе 1;

- отличается используемый показатель адиабаты $\gamma = 1.46$.

- для поддержания условия $\nabla B = 0$ в российской модели в уравнения включается дополнительный

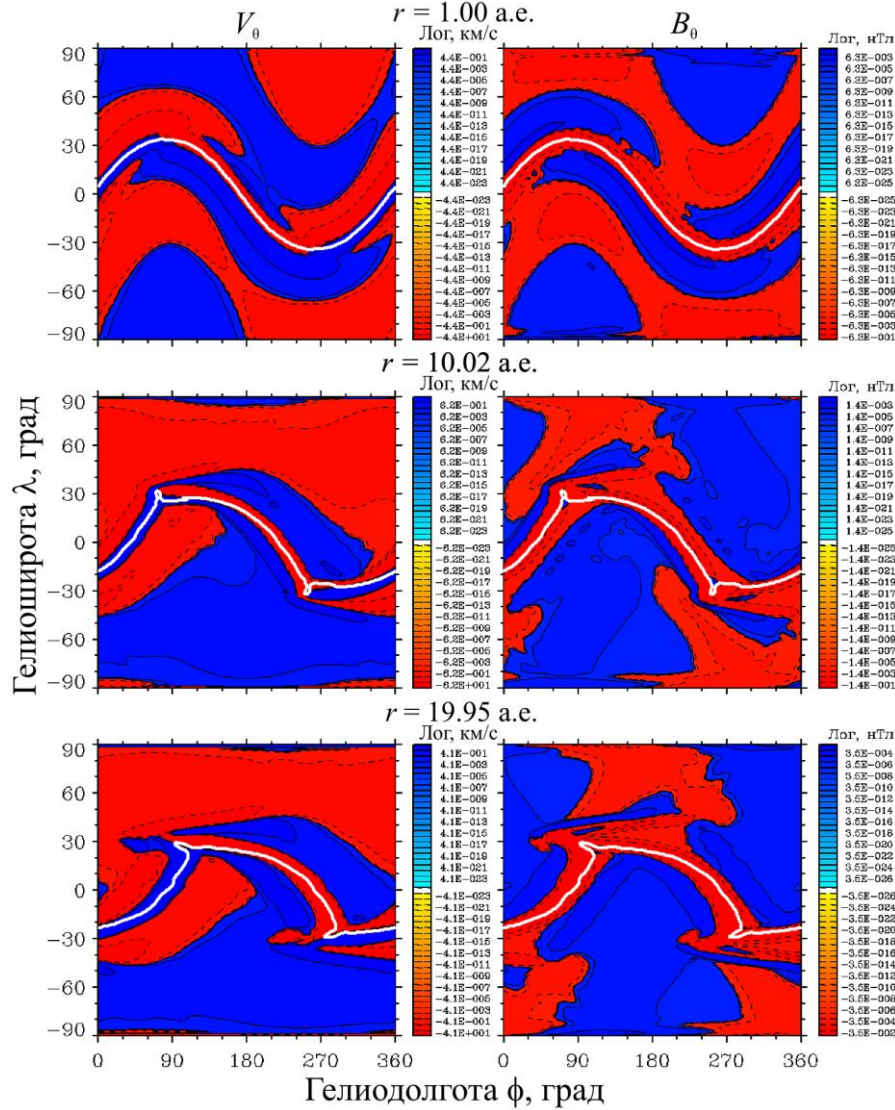


Рис. 5. Распределение полярных компонент скорости СВ (слева) и индукции ГМП (справа) по данным WSO с $L_{\max}=1$ на разных гелиоцентрических расстояниях. Обозначение типа изолиний то же, что на рис. 3, 4. Соответствие оттенка значению характеристики показано справа от каждой панели. В качестве линий ГТС показаны изолинии $B_r=0$, изображенные белой линией на картах как V_0 , так и B_0

источник [Powell et al., 1999], в то время как китайской командой использовался метод искусственной диффузии.

Отметим, что в работе [Shen et al., 2018], на методике которой основаны работы китайской группы, моделирование гелиосферных характеристик проводилось до расстояний $r=1.25$ а.е. и она нацелена на наилучшее описание наблюдений гелиосферных характеристик в районе орбиты Земли. Кроме того, из результатов моделирования КОВ для КО2066 по двум указанным моделям китайской группой в нашем распоряжении имелась лишь выборка для определенных расстояний, которая использовалась для моделирования интенсивности ГКЛ.

На рис. 6 сравниваются карты радиальных компонент скорости СВ и ГМП, рассчитанные для КО2066 по моделям GONG с $L_{\max}=8$ ([Luo et al., 2020]; левые панели) и с $L_{\max}=1$ (данная работа; правые панели) на трех гелиоцентрических расстояниях.

Как уже обсуждалось в работе [Крайнев и др., 2023], посвященной анализу результатов моделирования в [Luo et al., 2020] КОВ и ГКЛ для КО2066 с использованием модели GONG с $L_{\max}=8$, эволюция КОВ приводит к сильному и резкому уплотнению ГТС (см. левую среднюю панель рис. 6), а также к существенному изменению с расстоянием распределения модуля радиальной компоненты ГМП и общему понижению напряженности ГМП, усредненной по долготе. Постепенное уплотнение ГТС и изменение распределения B_r заметно и на правых панелях рис. 6. Однако по картам для отдельных расстояний на рис. 6 трудно представить общую картину зависимости характеристик ГМП от гелиоцентрического расстояния. На рис. 7 показана эта зависимость, а также относительное ослабление напряженности ГМП вследствие КОВ для детальной и дипольной моделей. Как и в работе [Крайнев и др., 2023], в качестве напряженности ГМП в отсутствие КОВ исполь-

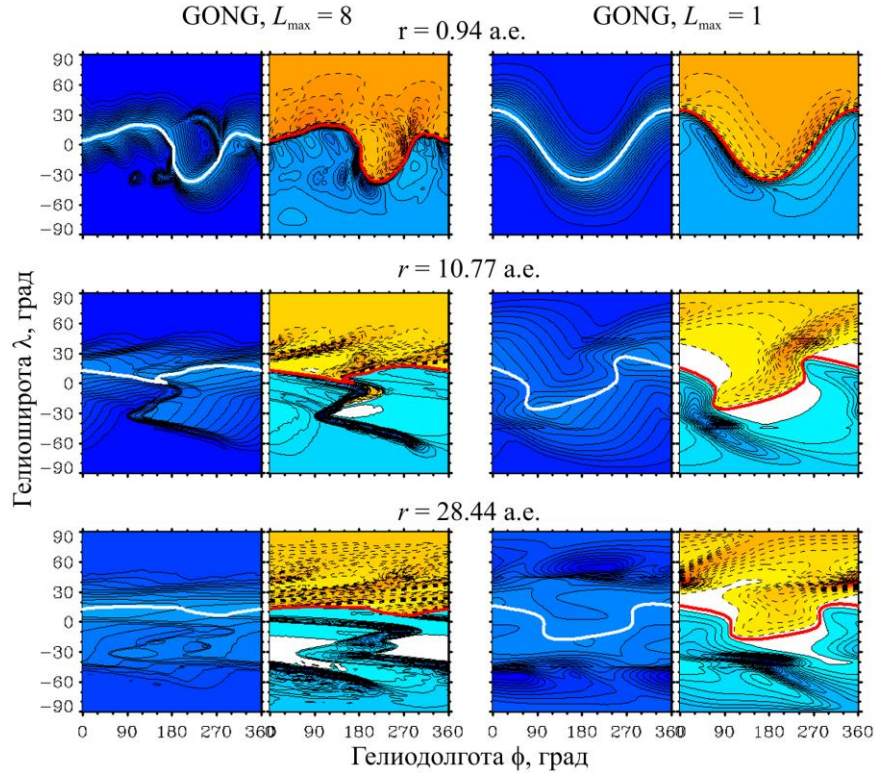


Рис. 6. Образование и эволюция с расстоянием КОВ, рассчитанной китайской группой, при использовании двух моделей фотосферного магнитного поля по данным GONG для КО 2066 с учетом гармоник до $L_{\max}=8$ (левые панели) и до $L_{\max}=1$ (правые панели) от внутренней гелиосферы до внешней границы МГД-моделирования. Расположение карт на панелях, а также смысл оттенков цвета, изолиний и линий ГТС тот же, что на рис. 3

зовалось паркеровское ГМП, соответствующее его радиальной компоненте на внутренней границе гелиосферы и скорости СВ на этой поверхности, усредненной по долготе:

$$\Delta_{\text{Par}}^{\text{MHD}}(r, \theta, \phi) = \frac{(B^{\text{MHD}}(r, \theta, \phi) - \bar{B}^{\text{Par}}(r, \theta, \phi))}{\bar{B}^{\text{Par}}(r, \theta, \phi)} \cdot 100\% \quad (16)$$

На верхних панелях рис. 7 видно, что начиная с нескольких астрономических единиц тилт ГТС, т. е. половина широтного диапазона, в котором располагается ГТС, систематически уменьшается. При этом для детальной модели ($L_{\max}=8$, левая панель) после постепенного спада от 3 до 10 а. е. происходит резкое уменьшение тилта из-за отрыва и исчезновения «островка» области $B_r < 0$ (см. среднюю левую панель рис. 6). Затем постепенный спад тилта продолжается. Для дипольной модели ($L_{\max}=1$, правая панель) тилт ГТС плавно уменьшается от примерно 35° до 15° без каких-либо катастрофических скачков.

В поиске причины такого систематического уменьшения зоны секторной структуры мы обратились к картам распределения полярных компонент V_θ и B_θ и их эволюции с расстоянием, показанным на рис. 8. Видно, что эти распределения довольно сложны и распределения их полярности существенно отличаются от распределения полярности B_r , о котором можно судить по положению линии $B_r = 0$. Как и для модели КОВ российской группы, в поведении V_θ можно выделить высокоширотную и низкоши-

ротную компоненты. Для высокоширотной компоненты поток СВ к полюсам не так однороден по долготе, как в модели российской группы, и на других долготах меняется на противоположный. Однако для низкоширотной компоненты V_θ поток СВ довольно однороден по долготе и направлен к экватору.

3. ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Все обсуждаемые модели КОВ основаны на результатах сканирования солнечных магнитных полей для КО2066, т. е. для периода, когда на Солнце существовали долгоживущие корональные дыры, а в гелиосферных характеристиках и интенсивности ГКЛ наблюдалась устойчивая 27-дневная вариация. Модели КОВ различались, во-первых, степенью детальности СМП, лежащих в основе моделирования, и, во-вторых, исходными данными СМП, пакетами программ и деталями алгоритма, используемыми для моделирования КОВ российской и китайской группами.

Что касается степени детальности СМП, для вычисления скорости СВ на внутренней границе гелиосферы обе группы использовали 1) более детальные данные, учитывающие члены в разложении радиальной компоненты СМП на фотосфере по полиномам Лежандра вплоть до $L_{\max}=8$, и 2) наиболее упрощенные данные, учитывающие только дипольные члены, т. е. до $L_{\max}=1$. Как уже упоминалось, из-за сильного возмущения формы ГТС для детальной

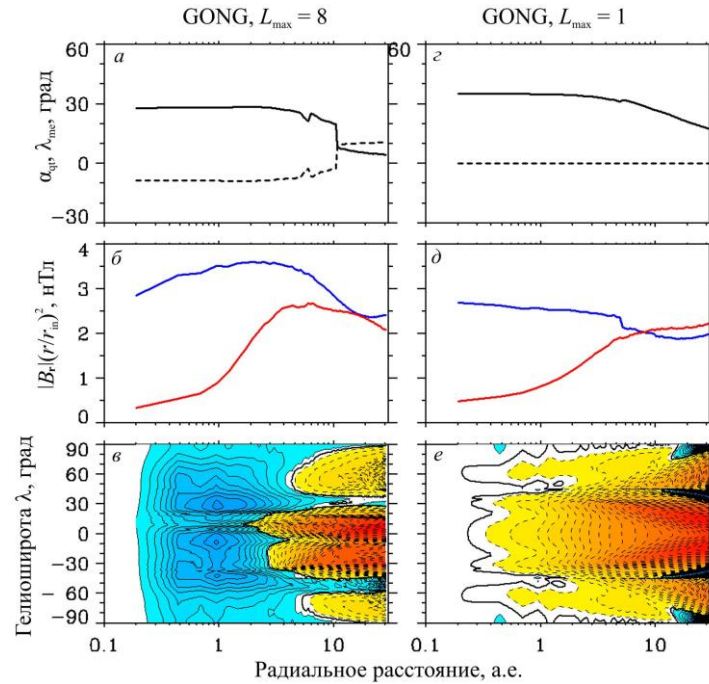


Рис. 7. Зависимость характеристик ГМП от гелиоцентрического расстояния для детальной ($L_{\max}=8$, а–е) и дипольной ($L_{\max}=1$, з–е) моделей. Панели а, з — полуширина широтного диапазона, занятого ГТС (так называемый тилт, сплошная черная линия) и ширина середины этого диапазона (магнитный экватор, штриховая черная линия). Панели б, д — усредненный по сфере модуль радиальной компоненты ГМП, умноженного на квадрат расстояния (синяя линия) и среднеквадратичный разброс этой характеристики (красная линия). Панели е, е — относительная разность между расчетным и паркеровским ГМП, рассчитанная по (16). Оттенками синего и сплошные синие изолинии — области положительных значений, оттенки желтого и красного и штриховые изолинии — отрицательных. Сплошная черная линия — нулевое значение (16), усредненного по долготе

модели на расстояниях $r=4\div7$ а.е. расчеты КОВ российской группой в модели с $L_{\max}=8$ на расстояниях $r>7$ а.е. не проводились. Естественно, общая картина распределения всех гелиосферных характеристик для модели детального СМП значительно более сложная, чем для дипольного. Однако при детальном рассмотрении можно выделить как схожие черты, так и особенности.

1. На внутренней границе гелиосферы распределения характеристик (особенно скорости СВ) по модели полного поля содержат значительно больше деталей, а форма ГТС более сложная. Общим является то, что положение глобального минимума скорости СВ совпадает с линией ГТС. Однако для детальной модели, кроме этого глобального минимума скорости, есть еще много локальных, а для дипольной модели других минимумов скорости СВ нет.

2. В обоих моделях на малых расстояниях (до $r=1\div2$ а.е.) усиление ГМП происходит к западу от ГТС, а ослабление — к востоку. Совокупность этих двух явлений иллюстрирует механизм образования КОВ и их генетическую связь с ГТС.

3. На средних расстояниях (до $r=4\div7$ а.е.), кроме КОВ, содержащих ГТС, образуются их продолжения на более высоких широтах (клюшкообразное, т.е. с изломом), не содержащее ГТС. С увеличением расстояния этот процесс отрыва КОВ от образовавшего его ГТС продолжается и на больших расстояниях области усиленного ГМП сосредотачиваются на средних широтах (примерно совпадающих с широтными

границами ГТС на внутренней поверхности гелиосферы), а на более высоких и более низких широтах ГМП ослабляется.

4. На средних и далеких расстояниях образуются две составляющие направленных по меридиану потоков СВ: высокоширотная и низкоширотная, границы между которыми тоже примерно совпадают с широтными границами ГТС на внутренней поверхности гелиосферы. Однородность этих потоков по долготе различна для КОВ, рассчитанных российской и китайской группами (см. ниже), однако в целом высокоширотный поток СВ направлен к полюсам, а низкоширотный — к экватору.

Следующие свойства соответствуют моделям КОВ, рассчитанным только китайской группой.

5. Начиная со средних расстояний полуширина широтного диапазона, занятого ГТС, т.е. тилт, существенно уменьшается. Для более сложных структур, образующихся в детальной модели, может оторваться (а затем рассосаться) островок противоположной полярности и ГТС станет значительно более плоским. В дипольной модели этого не происходит, но к границе области МГД-моделирования тилт уменьшается примерно в два раза. Кроме того, рассмотрение эволюции с расстоянием разных компонент скорости СВ и ГМП приводит к выводу, что сильно изменяется сама форма ГТС.

6. В обоих моделях с расстоянием долготный градиент скорости уменьшается (замещается широтным), т.е. ослабляется источник образования КОВ.

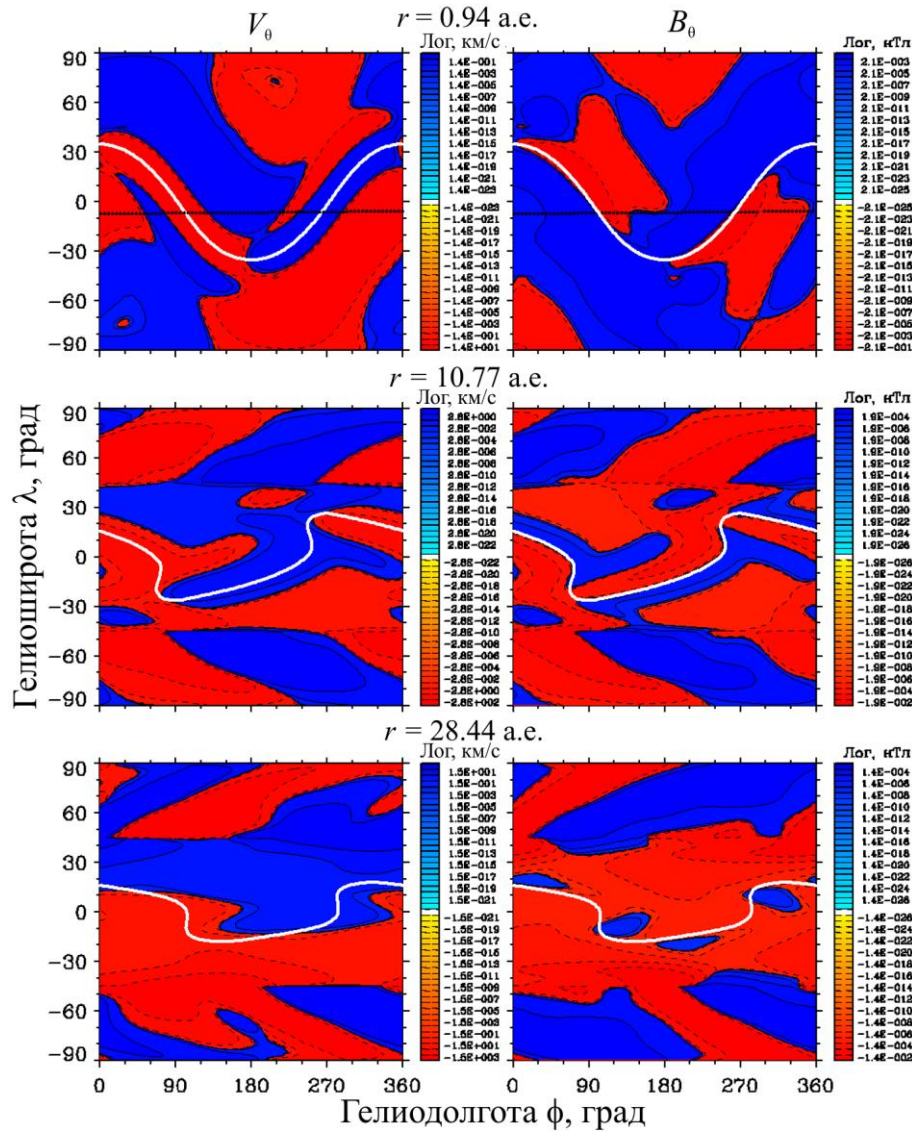


Рис. 8. Распределение полярных компонент скорости СВ (слева) и индукции ГМП (справа) по данным GONG с $L_{\max}=1$ на разных гелиоцентрических расстояниях. Обозначение типа изолиний то же, что на рис. 3, 4. Соответствие оттенка цвета значению характеристики показано справа от каждой панели. В качестве линий ГТС показаны изолинии $B_r=0$ (белые линии на картах V_θ и B_θ)

7. Для полной модели эволюция распределений скорости СВ и ГМП в основном закончена к 30 а.е., в отличие от дипольной модели, для которой медленная эволюция этой характеристики на 30 а.е., еще продолжается.

8. Слияния разных КОВ с образованием слившихся КОВ (Merged CIR, MCIR [Richardson, 2018]) в симуляциях не наблюдалось.

Из сравнения моделей КОВ, рассчитанных российской и китайской группами, можно сделать следующие выводы:

- форма ГТС, рассчитанного в моделях российской группы, существенно возмущается уже на расстояниях $r=4$ а.е;
- отмеченные выше особенности эволюции с расстоянием (отрыв КОВ от ГТС, уменьшение долготных и рост широтных градиентов скорости СВ и напряженности ГМП, изменение формы ГТС) в моделях российской группы проявляются намного слабее;

- степень долготной однородности высокоширотного и низкоширотного меридионального потоков СВ в моделях КОВ двух групп существенно различается: высокоширотный поток (к полюсам) более однороден в модели китайской группы, а низкоширотный поток (к экватору) — российской.

Для исправления возмущенности ГТС из-за недостатков его численного определения, по-видимому, надо использовать адаптивную сетку симуляции. Что касается двух других различий в моделях КОВ российской и китайской групп, их причины пока неясны. Однако складывается впечатление, что из перечисленных в разделе 2 особенностей модели китайской группы по сравнению с российской моделью основную роль могут играть три различия в постановке граничных условий на внутренней границе гелиосферы:

- 1) различная связь между скоростью V и плотностью N СВ ($VN=const$ и $V^3N \approx const$ на сфере $r=0.1$ а.е.)

в моделях российской и китайской групп соответственно;

2) использование на 0.1 а. е. инварианта $T/V = \text{const}$ и $T/V^2 = \text{const}$ в моделях российской и китайской групп соответственно;

3) использование существенно разных величин модуля радиальной напряженности магнитного поля (при приближенной зависимости как r^{-2}), соответствующего $B_r = 4.5$ нТл на $r = 1$ а. е. для российской модели и $B_r \approx 40$ нТл — для китайской.

Можно надеяться, что дальнейшая совместная работа приведет к решению указанных проблем и разработке более надежных моделей коротящих областей взаимодействия разноскоростных потоков солнечного ветра.

Работа Д.А. Павлова выполнена в Санкт-Петербургском международном математическом институте им. Леонарда Эйлера при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (соглашение № 075-15-2025-343 от 29.04.2025).

Авторы благодарны коллективу WSO, а также авторам пакетов PLUTO, POT3D и streamtracer.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Арутюнян С.Н., Кодуков А.В., Субботин М.О., Павлов Д.А. Прототип службы прогноза спокойного солнечного ветра на основе МГД-моделирования и граничных условий модели WSA. *Космические исследования*. 2023, т. 61, № 6, с. 447–453. DOI: [10.31857/S0023420623600113](https://doi.org/10.31857/S0023420623600113).
- Калинин М.С., Крайнев М.Б., Луо С., Подгитер М.С. Влияние коротящих областей взаимодействия солнечного ветра на долговременные вариации интенсивности галактических космических лучей. *Геомагнетизм и аэронавтика*. 2023, т. 63, № 5, с. 570–580. DOI: [10.31857/S0016794023600606](https://doi.org/10.31857/S0016794023600606).
- Калинин М.С., Крайнев М.Б., Луо С., Подгитер М.С. Влияние коротящих областей взаимодействия солнечного ветра на интенсивность ГКЛ в 2Д задачах модуляции. *Геомагнетизм и аэронавтика*. 2024, т. 64, № 7, с. 104–114. DOI: [10.1134/S0016793224700154R](https://doi.org/10.1134/S0016793224700154R).
- Крайнев М.Б., Калинин М.С., Базилевская Г.А. и др. О проявлении коротящих областей взаимодействия солнечного ветра в вариациях интенсивности ГКЛ. *Солнечно-земная физика*. 2023, т. 9, № 1, с. 10–21. DOI: [10.12737/szf-91202302](https://doi.org/10.12737/szf-91202302) / Krainev M.B., Kalinin M.S., Bazilevskaya G.A., et al. Manifestation of solar wind corotating interaction regions in gcr intensity variations *Sol.-Terr. Phys.* 2023, vol. 9, iss. 1, pp. 9–20. DOI: [10.12737/stp-91202302](https://doi.org/10.12737/stp-91202302).
- Arge C.N., Pizzo V.J. Improvement in the prediction of solar wind conditions using near-real time solar magnetic field updates. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2000, vol. 105, no. A5, pp. 10465–10479. DOI: [10.1029/1999JA900262](https://doi.org/10.1029/1999JA900262).
- Belcher J.W., Davis Jr L. Large-amplitude Alfvén waves in the interplanetary medium, 2. *J. Geophys. Res.* 1971, vol. 76, no. 16, pp. 3534–3563. DOI: [10.1029/JA076i016p03534](https://doi.org/10.1029/JA076i016p03534).
- Burlaga L.F., Klein L.W., Lepping R.P., Behannon K.W. Large-scale interplanetary magnetic fields: Voyager 1 and 2 observations between 1 AU and 9.5 AU. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 1984, vol. 89, no. A12, pp. 10659–10668. DOI: [10.1029/JA089iA12p10659](https://doi.org/10.1029/JA089iA12p10659).
- Forsyth R.J., Gosling J.T. Corotating and transient structures in the heliosphere. *The Heliosphere Near Solar Minimum. The Ulysses Perspective*. 2001, pp. 107–166.
- Gosling J.T., Pizzo V.J. Formation and evolution of corotating interaction regions and their three dimensional structure. *Space Sci. Rev.* 1999, vol. 89, no. 1, pp. 21–52. DOI: [10.1023/A:1005291711900](https://doi.org/10.1023/A:1005291711900).
- Guo X., Florinski V. Corotating interaction regions and the 27 day variation of galactic cosmic rays intensity at 1 AU during the cycle 23/24 solar minimum. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2014, vol. 119, no. 4, pp. 2411–2429. DOI: [10.1002/2013JA019546](https://doi.org/10.1002/2013JA019546).
- Guo X., Florinski V. Galactic cosmic-ray intensity modulation by corotating interaction region stream interfaces at 1 AU. *Astrophys. J.* 2016, vol. 826, no. 1, p. 65. DOI: [10.3847/0004637X/826/1/65](https://doi.org/10.3847/0004637X/826/1/65).
- Hoeksema J.T. Structure and evolution of the large scale solar and heliospheric magnetic fields: *PHD Thesis (Phys.)*. Stanford University, 1984, 222 p.
- Hundhausen A.J., Gosling J.T. Solar wind structure at large heliocentric distances: An interpretation of Pioneer 10 observations. *J. Geophys. Res.* 1976, vol. 81, no. 7, pp. 1436–1440. DOI: [10.1029/JA081i007p01436](https://doi.org/10.1029/JA081i007p01436).
- Kopp A., Wiengarten T., Fichtner H. Cosmic-ray transport in heliospheric magnetic structures. II. Modeling particle transport through corotating interaction regions. *Astrophys. J.* 2017, vol. 837, no. 1, p. 37. DOI: [10.3847/1538-4357/aa603b](https://doi.org/10.3847/1538-4357/aa603b).
- Luo X., Zhang M., Feng X., et al. A numerical study of the effects of corotating interaction regions on cosmic-ray transport. *Astrophys. J.* 2020, vol. 899, no. 2, p. 90. DOI: [10.3847/1538-4357/aba7b5](https://doi.org/10.3847/1538-4357/aba7b5).
- Luo X., Potgieter M.S., Krainev M., et al. A numerical study of the effects of a corotating interaction region on cosmic-ray transport: some features of different cosmic-ray composition and rigidity. *38th International Cosmic Ray Conference (ICRC2023)*. Nagoya, 2023.
- Luo X., Potgieter M.S., Zhang M., Shen F. A numerical study of the effects of a corotating interaction region on cosmic-ray transport. II. Features of cosmic-ray composition and rigidity. *Astrophys. J.* 2024, vol. 961, no. 1, p. 21. DOI: [10.3847/1538-4357/ad0cb6](https://doi.org/10.3847/1538-4357/ad0cb6).
- Mignone A., Bodo G., Massaglia S., et al. PLUTO: A numerical code for computational astrophysics. *Astrophys. J. Suppl. Ser.* 2007, vol. 170, no. 1, p. 228. DOI: [10.1086/513316](https://doi.org/10.1086/513316).
- Modzelewska R., Bazilevskaya G.A., Boezio M., et al. Study of the 27 day variations in GCR fluxes during 2007–2008 based on PAMELA and ARINA observations. *Astrophys. J.* 2020, vol. 904, no. 3, p. 13. DOI: [10.3847/1538-4357/abbdac](https://doi.org/10.3847/1538-4357/abbdac).
- Nikolic L. Modelling the magnetic field of the solar corona with potential-field source-surface and Schatten current sheet models. *Natural Resources Canada. Geological Survey of Canada, open file*. 2017.
- Parker E.N. Dynamics of the interplanetary gas and magnetic fields. *Astrophys. J.* 1958, vol. 128, p. 664. DOI: [10.1086/146579](https://doi.org/10.1086/146579).
- Pizzo V.J., Gosling J.T. 3-D simulation of high-latitude interaction regions: Comparison with Ulysses results. *Geophys. Res. Lett.* 1994, vol. 21, no. 18, pp. 2063–2066. DOI: [10.1029/94GL01581](https://doi.org/10.1029/94GL01581).
- Potgieter M.S. Solar modulation of cosmic rays. *Living Reviews in Solar Physics*. 2013, vol. 10, pp. 1–66. DOI: [10.12942/lrsp-2013-3](https://doi.org/10.12942/lrsp-2013-3).
- Powell K.G., Roe P.L., Linde T.J., et al. A solution-adaptive upwind scheme for ideal magnetohydrodynamics. *J. Computational Physics*, 1999, vol. 154, no. 2, pp. 284–309. DOI: [10.1006/jcph.1999.6299](https://doi.org/10.1006/jcph.1999.6299).
- Richardson I.G. Solar wind stream interaction regions throughout the heliosphere. *Living reviews in solar physics*. 2018, vol. 15, no. 1, p. 1. DOI: [10.1007/s41116-017-0011-z](https://doi.org/10.1007/s41116-017-0011-z).
- Riley P., Linker J.A., Mikic Z., Lionello R. A comparison between global solar magnetohydrodynamic and poten-

- tial field source surface model results. *Astrophys. J.* 2006, vol. 653, no. 2, p. 1510.
- Schatten K.H. Current sheet magnetic model for the solar corona. 1971, no. X-692-71-132.
- Schatten K.H., Wilcox J.M., Ness N.F. A model of interplanetary and coronal magnetic fields. *Solar Phys.* 1969, vol. 6, pp. 442–455.
- Shen F., Yang Z., Zhang J., et al. Three-dimensional MHD simulation of solar wind using a new boundary treatment: comparison with in situ data at Earth. *Astrophys. J.* 2018, vol. 866, no. 1, p. 18. DOI: [10.3847/1538-4357/aad806](https://doi.org/10.3847/1538-4357/aad806).
- Wang Y.M., Sheeley Jr N.R. Solar wind speed and coronal flux-tube expansion. *Astrophys. J.* 1990, vol. 355, pp. 726–732.
- Wang Y.X., Guo X.C., Wang C., et al. MHD modeling of the background solar wind in the inner heliosphere from 0.1 to 5.5 AU: Comparison with in situ observations. *Space Weather*. 2020, vol. 18, no. 6, p. e2019SW002262. DOI: [10.1029/2019SW002262](https://doi.org/10.1029/2019SW002262).
- Wiengarten T., Kleimann J., Fichtner H., et al. Cosmic ray transport in heliospheric magnetic structures. I. Modeling background solar wind using the CRONOS magnetohydrodynamic code. *Astrophys. J.* 2014, vol. 788, no. 1, p. 80. DOI: [10.1088/0004-637X/788/1/80](https://doi.org/10.1088/0004-637X/788/1/80).
- Zhu Y.J., Shen F., Luo X., et al. Solar energetic particles intensity variations associated with a tilted-dipole 3D corotating interaction region. *Earth and Planetary Physics*. 2024, vol. 8, no. 5, pp. 797–810. DOI: [10.26464/epp2024049](https://doi.org/10.26464/epp2024049).

- URL: <https://github.com/predsci/POT3D> (дата обращения 15 мая 2025 г.).
- URL: <http://www.swpc.noaa.gov/products/wsa-enlil-solar-wind-prediction> (дата обращения 15 мая 2025 г.).
- URL: <http://solarwind.entroforce.ru> (дата обращения 15 мая 2025 г.).
- URL: <http://wso.stanford.edu/Harmonic.los/ghlist.html> (дата обращения 15 мая 2025 г.).
- URL: <http://wso.stanford.edu/words/pfss.pdf> (дата обращения 15 мая 2025 г.).
- URL: <http://wso.stanford.edu/Harmonic.los/CR2066> (дата обращения 15 мая 2025 г.).
- URL: <https://github.com/sunpy/streamtracer> (дата обращения 15 мая 2025 г.).

Статья подготовлена по материалам Двадцатой ежегодной конференции «Физика плазмы в Солнечной системе», 10–14 февраля 2025 г., Институт космических исследований РАН, Москва, Россия.

Как цитировать эту статью:

Павлов Д.А., Крайнев М.Б., Калинин М.С., Кодуков А.В., Си Лю, Фан Шэнь, Юйцзи Чжу. МГД-моделирование коротирующих областей взаимодействия в гелиосфере с разными граничными условиями и разными программными пакетами. *Солнечно-земная физика*. 2025, т. 11, № 4, с. 114–126. DOI: [10.12737/szf-114202511](https://doi.org/10.12737/szf-114202511).