

УДК 523.62

ПРОТОТИП СЛУЖБЫ ПРОГНОЗА СПОКОЙНОГО СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА НА ОСНОВЕ МГД-МОДЕЛИРОВАНИЯ И ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ МОДЕЛИ WSA

© 2023 г. С. Арутюнян¹, А. Кодуков¹, М. Субботин¹, Д. Павлов^{1, 2, *}

¹Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет “ЛЭТИ”, Санкт-Петербург, Россия

²Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

*dapavlov@etu.ru

Поступила в редакцию 01.03.2023 г.

После доработки 12.03.2023 г.

Принята к публикации 13.03.2023 г.

Создан прототип службы МГД-моделирования спокойного солнечного ветра и прогнозирования скорости и плотности частиц солнечного ветра в межпланетном пространстве, аналогичной службам NOAA и ESA. Служба состоит из МГД-симулятора, модуля обработки результатов симуляции и веб-интерфейса. Симулятор основан на реализации метода TVDLF в пакете PLUTO. Граничные условия модели (плотность, радиальная скорость, магнитное поле, температура) на расстоянии 0.1 а. е. от начала координат получаются регулярно из соответствующей службы NOAA, в которой они рассчитаны по модели WSA на основании магнитограмм сети GONG. Доступны два режима граничных условий: постоянные и суточные. Симуляции проводились на равномерной сетке в диапазоне 0.1–1.7 а. е. по расстоянию (512 элементов), $-60^\circ \dots +60^\circ$ по широте (60 элементов), $0^\circ \dots 360^\circ$ по долготе (180 элементов). Проведено сравнение рассчитанных карт скорости и плотности частиц с расчетами NOAA SWPC и NASA CCMC при одинаковых граничных условиях. Проведено ретроспективное сравнение получаемых прогнозов с данными прямых измерений (OMNI).

DOI: 10.31857/S0023420623600113, EDN: SAХOKB

ВВЕДЕНИЕ

Потоки солнечной плазмы, достигающие Земли, способны вызывать сбои радиосвязи и навигации. В случае сильных воздействий заряженных частиц солнечной плазмы на магнитосферу Земли могут возникать индуцированные токи, нарушающие работу электросетей и электронных устройств. Сильные вспышки солнечной плазмы также представляют угрозу для космонавтов в открытом космосе.

Опасность, которую несет в себе солнечный ветер, привела к необходимости разработки служб прогнозирования солнечной погоды, а развитие методов численного моделирования и технологий мониторинга солнечной активности сделало создание таких служб возможным. Так, в США в составе Национального управления океанических и атмосферных исследований работает Центр прогноза космической погоды (*англ.* National Oceanic and Atmospheric Administration – Space Weather Prediction Center, NOAA – SWPC) (<https://www.swpc.noaa.gov/>), выпускающий регулярные прогнозы на основе трехмерной МГД-модели (магнитной гидродинамики) солнечного ветра ENLIL [1]. В 2012 г.

в Европейском космическом агентстве (*англ.* European Space Agency, ESA) было создано Управление космической погоды (*англ.* Space Weather Office, SWO) (<https://swe.ssa.esa.int/current-space-weather/>), которое к настоящему моменту получает прогнозы аналогичные SWPC с помощью программы EUNFORIA [2]. В России служба прогнозирования солнечного ветра разработана в Кисловодской Горной астрономической станции Главной (Пулковской) астрономической обсерватории (ГАС ГАО) (<http://solarstation.ru/sun-service/forecast>), прогнозы в этой службе основаны на кинетической модели [3]. В настоящей работе описан прототип новой службы прогноза солнечного ветра, аналогичной SWPC и SWO и основанной на трехмерной МГД-модели солнечной плазмы.

МЕТОД МОДЕЛИРОВАНИЯ

МГД-уравнения

Моделирование солнечной плазмы как жидкости, подчиняющейся МГД-уравнениям, осуществляется в секторе полого шара, внутренняя

граница которого имеет радиус 0.1 а. е. ($22.5 R_S$). Уравнения МГД выглядят следующим образом:

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

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

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

$$\frac{\partial (E_t)}{\partial t} + \nabla \cdot \left[\left(\frac{\rho \mathbf{v}^2}{2} + \rho e + p + \rho \Phi \right) \mathbf{v} + (-\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \times \mathbf{B} \right] = 0, \quad (4)$$

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

где ρ — плотность массы протонов; $\mathbf{v}$ — скорость; $\mathbf{m} = \rho\mathbf{v}$ — плотность импульса; p — давление; $\mathbf{B}$ — вектор магнитной индукции; Φ — гравитационный потенциал Солнца; Γ — показатель адиабаты, $\Gamma = 1.5$ [4]. Температура T не входит в уравнения (1)–(5), но связана с плотностью и давлением уравнением состояния: $p = k\rho T/(m_u\mu)$, где k — постоянная Больцмана; m_u — атомная единица массы; μ — средняя молярная масса частиц (принято значение $\mu = 0.616$). Здесь (1) — уравнение непрерывности, (2) — уравнение движения, (3) — уравнение магнитного поля, (4) — уравнение полной энергии, (5) — формула плотности полной энергии, являющейся суммой тепловой, кинетической и магнитной энергии.

В ENLIL для решения системы уравнений, аналогичной (1)–(4), используется метод уменьшения полной вариации с разностной схемой Лакса–Фридрихса (англ. Total Variation Diminishing Lax – Friedrich, TVDLF) [5]. В EUHFORIA используется метод Хартен–Лакса–ван Леера (англ. Harten – Lax – van Leer, HLL), основанный на решении задачи Римана. Коды обеих программ не являются публично доступными. В настоящей работе представлена программа, основанная на пакете PLUTO (<http://plutocode.ph.unito.it/>) [6], который содержит реализации численных методов решения систем уравнений в частных производных, в том числе разновидностей МГД для широкого спектра астрофизических моделей. В настоящей работе используется наиболее простая система (1)–(4), не содержащая сопротивления, вязкости и диссипации.

Граничные условия

Внутренние граничные условия уравнений (1)–(4) рассчитываются на основе эмпирической модели Wang–Sheeley–Arge (WSA) [7]. Входными

данными модели WSA служит синоптическая карта магнитограммы Солнца, а выходными — корональные карты (граничные условия) скорости частиц и напряженности магнитного поля на границе внешней короны ($21.5 R_S$). Выходные данные WSA преобразуются в граничные условия (ρ , v_r , B_r , B_ϕ , T) с использованием условия постоянства момента количества движения и некоторых предварительно заданных базовых значений ρ , v_r и T , с помощью программы wsa2bc. Сама программа отсутствует в свободном доступе, но итоговые граничные условия, рассчитанные с помощью WSA 2.2 на основе магнитограмм, предоставляемых сетью солнечных обсерваторий GONG (англ. Global Oscillation Network Group) (<https://gong.nso.edu/>); эти граничные условия используются в настоящей работе.

Несмотря на то, что действительная скорость вращения Солнца зависит от широты, в используемых граничных условиях, основанных на модели WSA, период вращения Солнца считается равным кэррингтоновому периоду 25.38 сут в инерциальной системе координат (СК) или 27.2753 сут (в СК НЕЕQ). В связи с тем, что используемые граничные условия представлены в СК НЕЕQ, моделирование также происходит в СК, совпадающей с НЕЕQ в начальный момент времени и вращающейся с постоянной угловой скоростью $\Omega_z = 2\pi/365.25$, что является достаточно хорошим приближением НЕЕQ. При этом в уравнения (1)–(4) вносятся члены, ответственные за центробежное и кориолисово ускорение. Граничные условия в ходе моделирования вращаются с указанным синодическим кэррингтоновским периодом 27.2753 сут.

Начальные условия

В ходе моделирования используются начальные условия двух видов: предварительные и фактические. Предварительные начальные условия вычисляются по следующим формулам:

$$\rho(r) = \frac{0.01\bar{\rho}}{r^2}, \quad B(r) = \frac{0.01\bar{B}}{r^2}, \quad (6)$$

$$T(r) = \frac{0.01\bar{T}}{r^2}, \quad v_r(r) = \bar{v},$$

где $\bar{\rho}$, $\bar{B}$, $\bar{T}$, $\bar{v}$ — средние значения граничных условий на дату начала прогноза.

Перед началом построения прогноза необходимо ввести тривиальные начальные условия за границы поля симуляции (1.7 а. е.), что происходит в течение 10 сут моделирования. Время в данной процедуре отсчитывается от момента времени за 10 сут от начала прогноза. Таким образом, к началу прогноза получаются фактические начальные условия.



Рис. 1. Схема взаимодействия компонент службы.

При вычислении начальных условий реализованы два режима граничных условий: постоянные и суточные. В первом режиме используются единые граничные условия, соответствующие моменту начала прогноза, во втором — граничные условия, рассчитанные на начало каждого из десяти предыдущих суток, с линейной интерполяцией внутри суток.

ТЕХНИЧЕСКИЕ ПОДРОБНОСТИ

Используется равномерная трехмерная сетка в сферической СК в диапазоне 0.1–1.7 а. е. по расстоянию (512 элементов), $-60^\circ \dots +60^\circ$ по широте (60 элементов), $0^\circ \dots 360^\circ$ по долготе (180 элементов). Шаг по времени постоянный, равен 0.0005 сут (при увеличении шага численный метод расходится).

В PLUTO реализована поддержка параллельных вычислений посредством интерфейса передачи сообщений (*англ.* Message Passing Interface, MPI). При расчете на шести ядрах процессора AMD EPYC 7742 вытаскивание начальных условий занимает 187 мин, а дальнейшая симуляция на 5 сут занимает 91 мин.

Результаты моделирования сохраняются в файлы формата dbf (внутренний формат PLUTO; одному файлу соответствует трехмерная карта значений основных переменных модели). Сохранение происходит каждый час модельного времени; таким образом, прогноз на 5 сут состоит из 121 карты. Также есть возможность сохранения карт в формате VTK.

ОБЗОР СОЗДАННОГО ПРОТОТИПА СЛУЖБЫ

Связь компонент службы

На рис. 1 изображена схема связи модулей разработанной службы. Модуль загрузки граничных условий запрашивает данные с веб-сайта NOAA. Модуль запуска PLUTO ожидает новых входных данных; как только данные будут получены, запускается численное моделирование, основанное на PLUTO. Затем на основе полученных трехмерных карт строятся двумерные изображения плотности и скорости частиц; далее двумерные изображения объединяются в видеофайл и передаются на веб-сайт. Схема устроена таким образом, чтобы можно было в случае ошибок вручную запускать отдельные модули.

Построение двумерных изображений

Модуль построения изображений использует значения плотности и скорости частиц на дискретной сетке размера $512 \times 60 \times 180$, полученные в ходе МГД-моделирования на различные моменты времени. Изображения представляют собой срезы в двух плоскостях: плоскости, параллельной плоскости солнечного экватора и пересекающей Землю и плоскости YZ СК HEEQ. Для получения изображений, разрешающая способность которых превосходит разрешающую способность сетки, применяется трилинейная интерполяция.

Широта Земли в СК HEEQ рассчитывается на основе эфемериды EPM2021 [8], разработанной в Институте прикладной астрономии РАН. Там же разработана онлайн-служба (<https://iaaras.ru/dept/ephemeris/online/>), которая позволяет рассчитать эфемериду геоцентрических положений Солнца ES^{eq} в экваториальной СК. Гелиоцентрические координаты Земли в HEEQ рассчитываются по следующей формуле:

$$SE^{HEEQ} = R_z(\alpha) R_x(-26.13) R_z(-16.13) [-ES^{eq}],$$

где α выбирается таким образом, чтобы выполнялось условие $SE_y^{HEEQ} = 0$.

Веб-сайт

Построенные 121 растровые изображения с помощью пакета FFmpeg конвертируются в видеофайл формата mp4, при этом задается количество кадров в секунду, который передается на разработанный веб-сайт прогноза солнечного ветра (<http://solarwind.entroforce.ru/>). На рис. 3 представлена основная часть сайта с прогнозом.

Большинство браузеров поддерживает функцию перехода в видео на определенный кадр; информация о количестве кадров в секунду позволяет реализовать на сайте полосу прокрутки для выбора отдельных кадров в видеофайле. Данный подход достаточно эффективен, так как предоставляет возможность почасового просмотра прогноза при объеме данных, передаваемых на клиентскую систему, около 1.5 Мбайт за 5 сут.

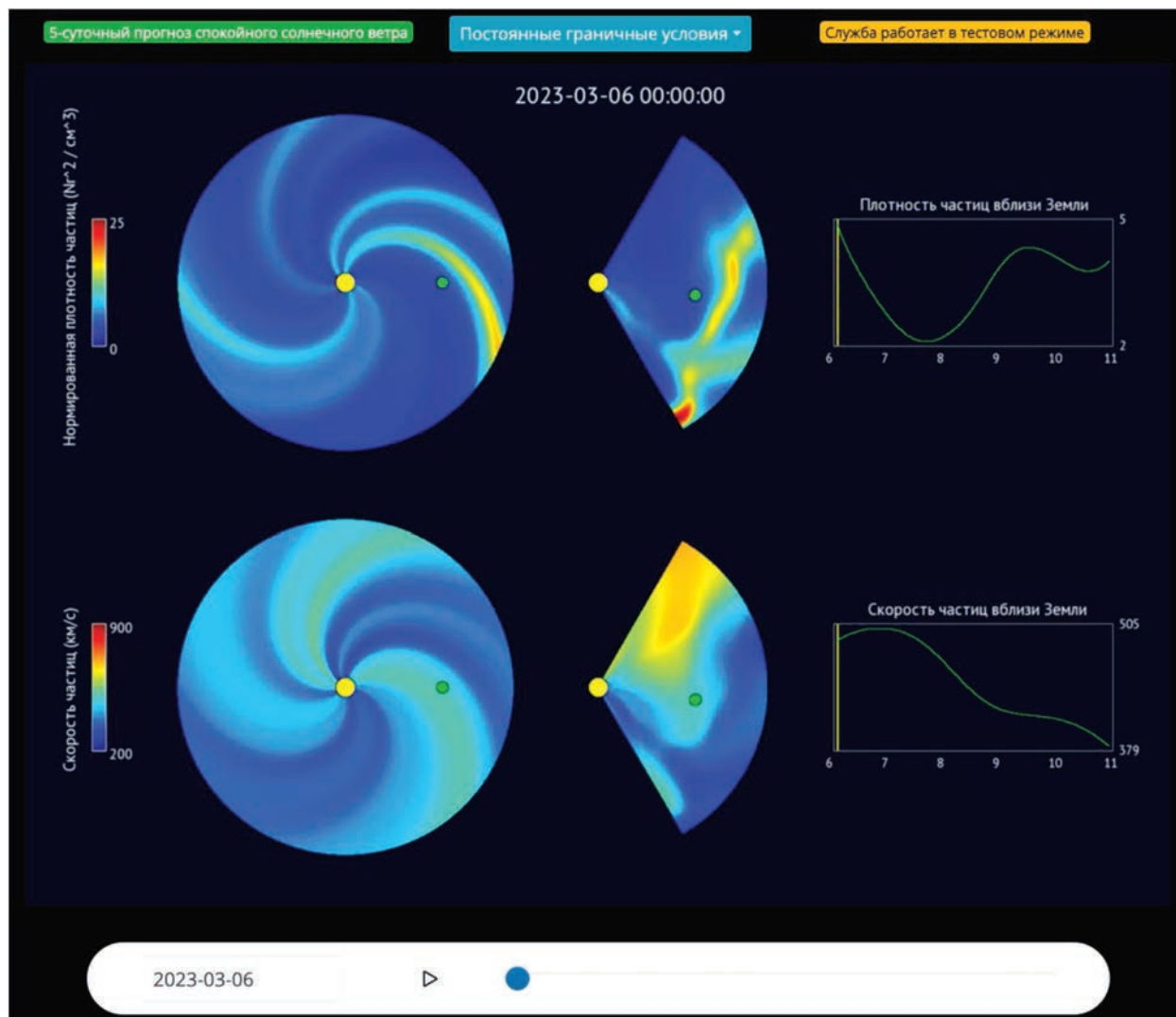


Рис. 2. Разработанный веб-сайт прогноза спокойного солнечного ветра.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Сравнение с SWPC

Служба SWPC позволяет запрашивать архивные данные о симуляции на конкретную дату, однако полное сравнение трехмерной сетки для SWPC провести невозможно. В предоставляемых архивах содержатся графические изображения и исходные данные этих изображений (срезы в горизонтальной плоскости широты Земли и плоскости YZ СК HEEQ, а также графики скорости и плотности частиц в точках, соответствующих положению Земли и космических обсерваторий STEREO A/B).

Сравнение проводилось в плоскости широты Земли. На рис. 3 представлено качественное сравнение карт нормированной плотности и скорости солнечного ветра. В верхней части изображены карты из PLUTO, а в нижней части находятся карты из SWPC. За исключением цветовой палитры

изображения сопоставимы. В табл. 1 приведено численное сравнение значений в рассматриваемой плоскости, можно заметить, что средняя разность значений составляет около 3.7% от среднего для скорости и 14.3% для нормированной плотности.

Сравнение с CCMC

Центр моделирования, координируемый сообществом — CCMC (англ. Community Coordinated Modeling Center) (<https://ccmc.gsfc.nasa.gov/>) — служба, предоставляющая доступ к различным реализациям алгоритмов моделирования космической погоды. Данный ресурс позволяет запрашивать результаты расчетов программ, входные данные для которых определяются пользователем. В том числе CCMC предоставляет доступ к запуску ENLIL, благодаря чему существует возможность сверить результат ее работы с вычислениями, проведенными в настоящей работе. В от-

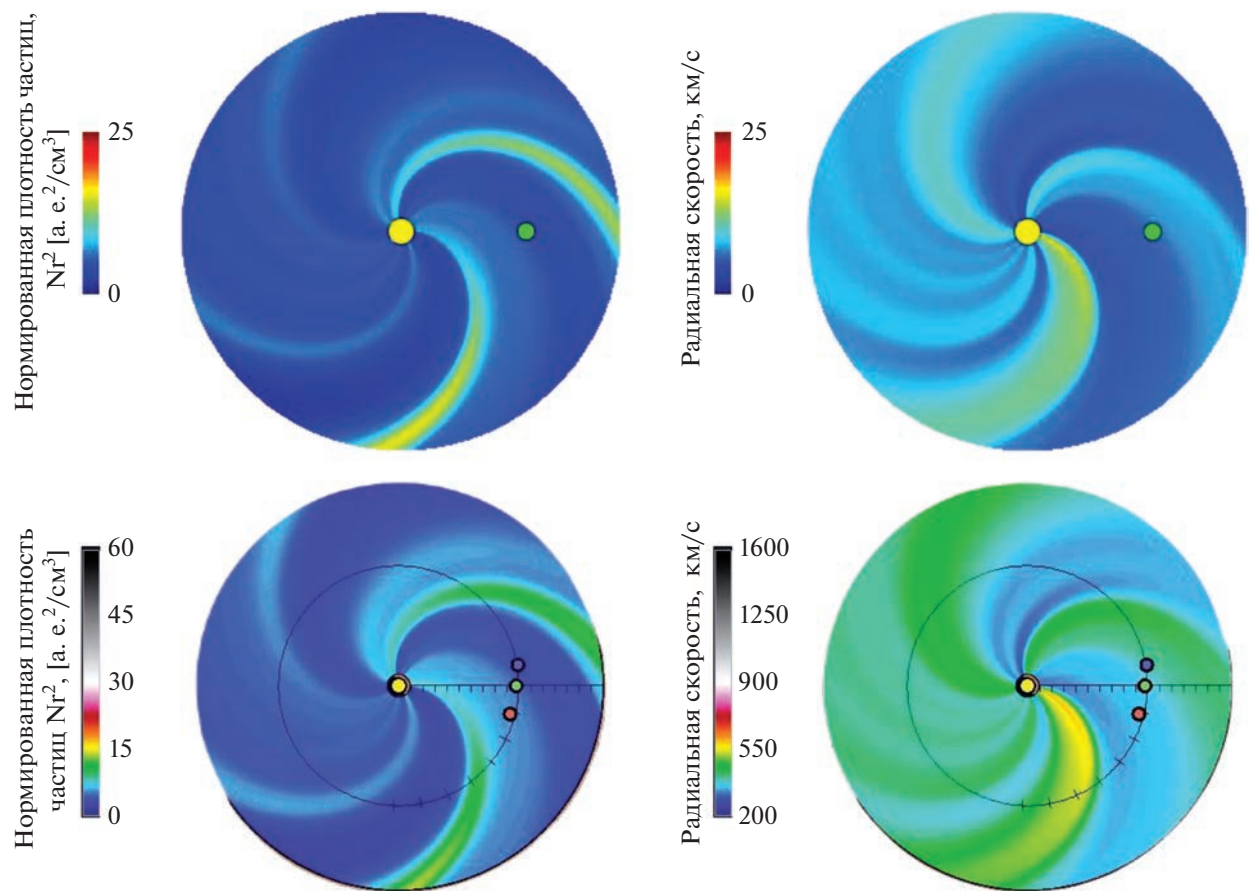


Рис. 3. Карты скорости и плотности частиц в PLUTO (сверху) и SWPC (снизу) за 26.XII.2022.

личие от SWPC, CCMC предоставляет численные результаты симуляции в виде трехмерной сетки. Граничные условия, используемые в симуляциях CCMC, также доступны в составе расширенного архива данных (raw). Последний доступный цикл вращения Солнца для симуляции в CCMC на момент написания статьи 7.VI.2021–4.VII.2021, поэтому для сравнения был выбран именно он.

Сравнение с CCMC проводилось аналогично сравнению с SWPC. Карты плотности и скорости представлены на рис. 4, в верхней части изображения находятся карты PLUTO, а в нижней – карты из CCMC. Численные результаты представлены в табл. 2, в этом случае средняя разность значений составляет 32.4% от среднего значения плотности и 11.2% от среднего значения скорости.

Сравнение с OMNI

OMNI (<https://omniweb.gsfc.nasa.gov/>) – регулярно обновляемый набор данных, содержащий информацию о параметрах солнечного ветра, собираемый различными космическими аппаратами (КА). В частности измерения КА ACE и Wind позволяют оценить плотность и скорость частиц солнечной плазмы вблизи Земли.

Был проведен расчет прогноза скорости и плотности частиц солнечного ветра на основе моделирования в течение 5 сут с 26.XII.2022 по 31.XII.2022 как с постоянными граничными условиями, так и с суточными. Результаты моделирования представлены на рис. 5.

Таблица 1. Сравнение результатов моделирования солнечного ветра PLUTO и ENLIL (моделирование выполнено в SWPC)

Величина	МГД-Модель	min	max	mean	Средняя абсолютная разность
v , км	PLUTO	282.1	639.0	403.1	14.9
	ENLIL (SWPC)	272.9	647.4	400.9	
ρ , cm^{-3}	PLUTO	1.8	13.9	4.8	0.7
	ENLIL (SWPC)	1.9	14.2	4.9	

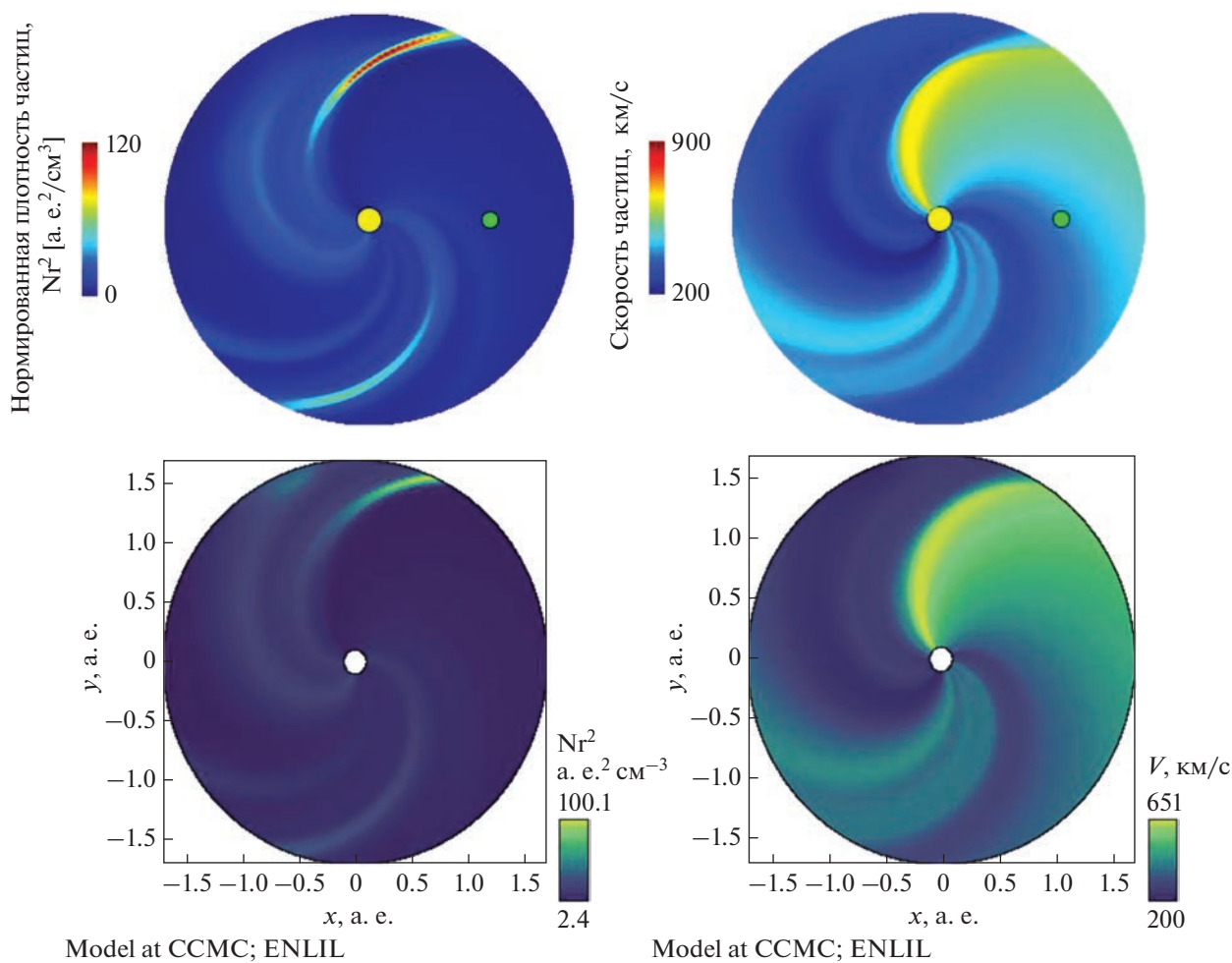


Рис. 4. Карты скорости и плотности частиц в PLUTO (сверху) и CCMC (снизу) за 7.VI.2021.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан прототип службы регулярного прогнозирования солнечного ветра по трехмерной МГД-модели на основе математического пакета PLUTO. Ежедневно обновляемые прогнозы на 5 сут представлены на сайте (<http://solar-wind.entroforce.ru/>). Полученные карты солнечного ветра в целом соответствуют зарубежным аналогам при одинаковых граничных условиях моделирования. Есть различия, которые, по всей видимости, обусловлены следующими причинами:

- модель ENLIL в настоящее время учитывает эффект объемного нагрева плазмы (*англ.* volumet-

ric heating). В реализации PLUTO данный эффект отсутствует; значение показателя адиабаты $\Gamma = 1.5$ позволяет частично компенсировать этот недостаток [2], но не в полной мере;

- значения средней молярной массы μ в реализациях ENLIL, использующихся в CCMC и SWPC, не приводятся; они могут отличаться от значения $\mu = 0.616$, использованного в данной работе;

- при математической эквивалентности МГД-уравнений и численных схем для их решения, используемых в ENLIL и PLUTO, различия

Таблица 2. Сравнение результатов моделирования солнечного ветра PLUTO и ENLIL (моделирование выполнено в CCMC)

Величина	МГД-Модель	min	max	mean	Средняя абсолютная разность
v , км	PLUTO	199.8	650.4	373.1	41.8
	ENLIL (CCMC)	200.6	650.4	374.8	
ρ , cm^{-3}	PLUTO	1.9	116.1	9.9	3.2
	ENLIL (CCMC)	2.3	95.5	10	

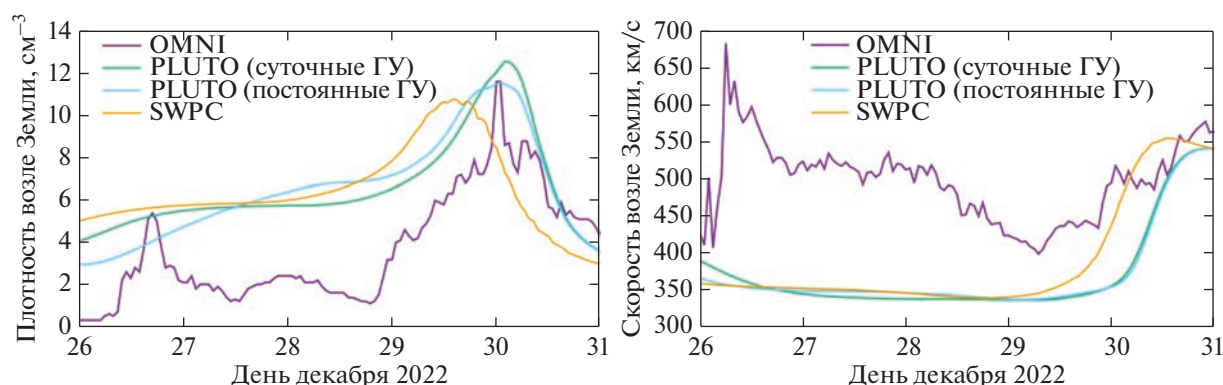


Рис. 5. Скорость и плотность частиц вблизи Земли с 26.XII.2022 по 31.XII.2022.

в реализациях могут оказывать влияние на получаемые результаты.

Данный вопрос требует дальнейшего исследования.

Развитие созданного прототипа службы прогноза солнечного ветра будет происходить по следующим направлениям:

- моделирование корональных выбросов массы;
- учет в МГД-модели дополнительных эффектов, в частности сопротивления;
- использование непосредственных данных модели WSA и восстановление граничных условий по этим данным (сейчас служба использует вторичные данные, рассчитанные программой wsa2bc);
- разработка совместной с Кисловодской ГАС службы прогноза, использующей граничные условия, рассчитанные по отечественным наблюдательным данным [9].

Еще одним интересным направлением представляется использование рассчитанных карт электронной плотности для учета задержки в солнечной плазме сигнала между Землей и КА на орбите Марса или Меркурия, что важно для построения высокоточных эфемерид Солнечной системы [10].

Авторы благодарны Душану Одстрчилу (англ. Dusan Odstrcil, George Mason University) за ценные советы. Авторы также благодарны Алексею Печёркину и Наталье Станниковой (ЛЭТИ) за деятельное участие на раннем этапе работы. Авторы благодарны коллективу ССМС за возможность проведения симуляций (симуляция, проведенная в ходе настоящей работы, доступна на сайте ССМС по идентификатору Aleksandr_Kodukov_101722_SH_1).

Исследование Д. А. Павлова выполнено в Санкт-Петербургском международном математическом институте имени Леонарда Эйлера при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (соглашение № 075–15–2022–287 от 06.04.2022).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Odstrcil D.* Modeling 3-D solar wind structure // *Advances in Space Research*. 2003. V. 32. Iss. 4. P. 497–506. [https://doi.org/10.1016/S0273-1177\(03\)00332-6](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(03)00332-6)
2. *Pomoell J., Poedts S.* EUHFORIA: European heliospheric forecasting information Asse 2.0t // *J. Space Weather Space Climate*. 2018. V. 8. Art. ID. A35. <https://doi.org/10.1051/swsc/2018020>
3. *Tlatov A.G., Berezin I.A., Strelkov M.A.* Simulation of Coronal Mass Ejection Propagation Based on Data from Ground-Based Patrol Observations // *Geomagnetism and Aeronomy*. 2019. V. 59. Iss. 7. P. 843–845. <https://doi.org/10.1134/S0016793219070247>
4. *Odstrcil D., Mays M.L., Hess Ph. et al.* Operational Modeling of Heliospheric Space Weather for the Parker Solar Probe // *The Astrophysical J. Supplement Ser.* 2020. V. 246. Iss. 2. Art. ID. 73. 19 p. <https://doi.org/10.3847/1538-4365/ab77cb>
5. *Tóth G., Odstrčil D.* Comparison of Some Flux Corrected Transport and Total Variation Diminishing Numerical Schemes for Hydrodynamic and Magneto-hydrodynamic Problems // *J. Computational Physics*. 1996. V. 128. Iss. 1. P. 82–100. <https://doi.org/10.1006/jcph.1996.0197>
6. *Mignone A., Bodo G., Massaglia S. et al.* PLUTO: a numerical code for computational astrophysics // *The Astrophysical J. Supplement Series*. 2007. V. 170. Iss. 1. Art. ID. 228. <https://doi.org/10.1086/513316>
7. *Arge C.N., Pizzo V.J.* Improvement in the prediction of solar wind conditions using near-real time solar magnetic field updates // *J. Geophysical Research: Space Physics*. 2000. V. 105. Iss. A5. P. 10465–10479. <https://doi.org/10.1029/1999JA000262>
8. *Pitjeva E., Pavlov D., Aksim D., Kan M.* Planetary and lunar ephemeris EPM2021 and its significance for Solar system research // *Proc. Intern. Astronomical Union*. 2019. V. 15. Iss. S364. P. 220–225. <https://doi.org/10.1017/S1743921321001447>
9. *Berezin I., Tlatov A.* Coronal Field Geometry and Solar Wind Speed // *Universe* 2022. V. 8. Iss. 12. Art. ID. 646. <https://doi.org/10.3390/universe8120646>
10. *Aksim D., Pavlov D.* Improving the solar wind density model used in processing of spacecraft ranging observations // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 2022. V. 514. Iss. 3. P. 3191–3201. <https://doi.org/10.1093/mnras/stac1229>