

ПОИСК СОЛНЕЧНЫХ ИСТОЧНИКОВ МЕЖПЛАНЕТНЫХ КОРОНАЛЬНЫХ ВЫБРОСОВ МАССЫ С ПОМОЩЬЮ ОБРАТНОЙ МОДЕЛИ МАГНИТОДИНАМИЧЕСКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА В ГЕЛИОСФЕРЕ

© 2023 г. Д. Г. Родькин^{1,*}, В. А. Слемзин¹, Ю. С. Шугай²

¹ Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

² Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д. В. Скобелыцина Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, Москва, Россия

*E-mail: rodkindg@gmail.com

Поступила в редакцию 28.09.2022 г.

После доработки 26.10.2022 г.

Принята к публикации 08.12.2022 г.

При разработке и тестировании методов прогнозирования межпланетных корональных выбросов массы (МКВМ) большое значение имеет установление их связи с источниками на Солнце — корональными выбросами массы (КВМ), наблюдаемыми коронографами. Часто применяемый обратный баллистический расчет времени старта КВМ не учитывает изменения их скорости при движении в гелиосфере и может давать неопределенность вплоть до суток. С хорошей точностью (порядка ± 10 ч) движение КВМ в гелиосфере от Солнца до Земли описывается моделью магнитодинамического взаимодействия КВМ с фоновым солнечным ветром (drag-based model, DBM). В данной работе для поиска возможных корональных источников МКВМ, наблюдаемых у Земли, предлагается использование обратной модели магнитодинамического взаимодействия (reverse DBM, RDBM), с помощью которой по измеренным параметрам МКВМ в обратном ходе восстанавливается вероятное движение КВМ в гелиосфере и определяются их параметры на выходе из солнечной короны. В модели используются данные о скорости фонового солнечного ветра, рассчитываемые по площади корональных дыр в центральной части Солнца, представленные на сайте Центра анализа космической погоды НИИЯФ МГУ, с корректирующими коэффициентами.

Ключевые слова: солнечный ветер, корональные выбросы массы

DOI: 10.31857/S0004629923030064, **EDN:** POAZCC

1. ВВЕДЕНИЕ

Актуальной задачей предсказания космической погоды является среднесрочное (от 1 до 5 дней) прогнозирование прихода к Земле транзитов солнечного ветра (межпланетных корональных выбросов массы — МКВМ), связанных с корональными выбросами массы (КВМ), которое может быть выполнено по оптическим наблюдениям солнечной короны. Для этого необходимо установление связи между источниками возмущения в короне и их проявлениями в солнечном ветре (СВ) на 1 а.е. (вблизи Земли).

МКВМ являются гелиосферным продолжением КВМ. Основными признаками МКВМ, наиболее часто используемыми при их идентификации, являются: резкое возрастание скорости и плотности протонов с последующим спадом; повышенная напряженность магнитного поля; падение протонной температуры T_p ниже $0.5 \times T_{\text{exp}}$

(T_{exp} — значение температуры, ожидаемой по величине скорости, исходя из зависимости, установленной для квазистационарных потоков за длительный период времени); низкое значение протонного параметра плазмы $\beta < 1$ (отношение газодинамического давления к магнитному) [1–3].

КВМ обнаруживаются коронографами над солнечным лимбом в форме ярких расширяющихся плазменных структур. Свечение КВМ в видимом диапазоне обусловлено томсоновским рассеянием излучения фотосферы на электронах плазмы выброса, имеющей большую плотность, чем окружающая корона. Формирование КВМ в солнечной короне может быть обнаружено по характерным корональным структурам, которые фиксируются в ВУФ изображениях солнечной короны в ходе систематических наблюдений [4, 5].

Часто КВМ сопровождаются диммингами [6, 7]. Димминги — локальные области короны с пониженным уровнем излучения в ВУФ области

спектра и мягком рентгене, обусловленные падением плотности плазмы из-за ухода вещества в результате выброса массы из нижней короны [6, 8, 9]. Димминги несут в себе важную информацию о зарождении и раннем этапе развития КВМ до того, как они фиксируются в коронографе. Локализация диммингов в центральной части солнечного диска является важным критерием идентификации КВМ, направленных в сторону Земли.

В гелиосфере на движение КВМ оказывают сильное влияние силы динамического взаимодействия между магнитными полями плазменного жгута и фонового СВ [10, 11]. Эта зависимость положена в основу эмпирической аэродинамической модели движения КВМ — drag-based model (DBM [12–16]). В этой модели на расстояниях от поверхности Солнца более $20 R_{\odot}$, где силы Лоренца и гравитации практически не влияют на движение плазмы исходящего солнечного ветра, ускорение и скорость КВМ вследствие магнитодинамического взаимодействия с фоновым ветром изменяются согласно эмпирическим соотношениям:

$$\frac{dv}{dt} = -\gamma(v - w)|v - w|,$$

$$v(t) = \frac{v_0 - w}{1 \pm \gamma(v_0 - w)t} + w,$$

где $v(t)$ — текущая скорость КВМ, v_0 — скорость КВМ в начальной точке на $20 R_{\odot}$, w — скорость фонового солнечного ветра, γ — коэффициент взаимодействия, знак плюс соответствует случаю $v_0 > w$, минус — $v_0 < w$ [12–15, 17]. В базовой версии DBM предполагается, что w и γ постоянны вдоль всей траектории распространения СВ в гелиосфере.

Согласно данной модели, КВМ тормозится, если его начальная скорость больше скорости фонового ветра, и ускоряется в противоположном случае. Магнитогидродинамическое моделирование [12] показало, что для плотных КВМ коэффициент γ зависит от соотношения плотностей КВМ и фонового солнечного ветра. Наименьшее значение γ соответствует случаю, когда плотность КВМ больше плотности фонового солнечного ветра. Если плотность КВМ меньше плотности фонового ветра, то γ быстро растет. Значение γ зависит от параметров КВМ и фонового СВ и может изменяться от $0.2 \times 10^{-7} \text{ км}^{-1}$ (для массивных КВМ в быстром разреженном СВ) до $2 \times 10^{-7} \text{ км}^{-1}$ (для КВМ с низкой плотностью в медленном плотном СВ) [14]. Средняя ошибка предсказания появления МКВМ на расстоянии 1 а.е. с помощью DBM по времени оценивается в ± 10 ч, по скорости — $\pm 50 \text{ км/с}$ [16, 18].

Таким образом, для прогноза с использованием DBM прихода к Земле МКВМ, связанных с

наблюдаемыми КВМ, необходимо задать время появления и скорость КВМ на расстоянии $20 R_{\odot}$ от Солнца и принять предположения 1) о поведении скорости фонового СВ на протяжении всей траектории движения от Солнца до Земли и 2) о коэффициенте γ , учитывающем взаимодействие между КВМ и фоновым СВ, поскольку два этих фактора заранее неизвестны.

В данной работе была решена обратная задача поиска КВМ-источников для уже зарегистрированных у Земли МКВМ с помощью трансформации алгоритма DBM в его обратную версию (reverse DBM или RDBM), в которой движение МКВМ рассматривается в обратном направлении (от Земли до Солнца). Приводятся описание алгоритма RDBM и результаты тестирования его работы на примере нахождения солнечных источников для серии из 17 МКВМ в период 2013–2015 гг. Результаты данной работы были использованы для оптимизации метода прогноза МКВМ, разрабатываемого в Центре анализа космической погоды НИИЯФ МГУ [19].

2. ДАННЫЕ И МЕТОДЫ

В качестве начальных параметров в расчете по RDBM использовались время начала и средняя скорость МКВМ из каталога Ричардсона и Кейн (далее каталог R&C¹ [3]).

В качестве скорости фонового СВ для RDBM расчета использовались данные прогноза квазистационарных потоков СВ, полученные в Центре анализа космической погоды НИИЯФ МГУ (далее SMDC²). Для этих скоростей были введены поправочные коэффициенты на основе данных о типах СВ и их скоростях, полученных из каталога солнечных событий Института космических исследований (далее каталог ИКИ³ [2]) и данных OMNI⁴ за период 2013–2015 гг. Для сравнения, в качестве варианта использовалась также и неизменная во всей гелиосфере скорость фонового СВ.

В результате RDBM расчета устанавливались возможные времена появления и скорости источника на расстоянии $20 R_{\odot}$ от поверхности Солнца. Такой расчет дает возможные значения параметров КВМ в начальной точке солнечной короны, по которым можно подобрать наиболее подходящий КВМ из реально зарегистрированных и оценить неизвестные заранее параметры задачи — скорость фонового СВ и коэффициент γ — по наименьшему расхождению рассчитанных и измеренных значений.

¹ <https://izw1.caltech.edu/ACE/ASC/DATA/level3/icmetable2.html>

² https://swx.sinp.msu.ru/models/solar_wind.php?gcm=1&lang=ru

³ <http://www.iki.rssi.ru/pub/omni>

⁴ <https://omniweb.gsfc.nasa.gov>

Результаты RDBM-расчета сравнивались с данными измерений коронографа LASCO (The Large Angle Spectroscopic Coronagraph [20]), представленными в каталоге KBM Computer Aided SME Tracking (CACTus⁵ [21]). Времена появления KBM пересчитывались на поверхность Солнца и сопоставлялись с диммингами, зарегистрированными в каталоге Solar Demon⁶ [22].

3. АЛГОРИТМ RDBM

Для определения времени и скорости старта KBM на расстоянии $20 R_{\odot}$ от Солнца по времени и скорости появления MKBM у Земли применялся RDBM алгоритм, основанный на использовании безразмерного параметра $z = \frac{v-w}{w}$, устанавливающего связь скорости KBM (v) и скорости фона (w). В начальной точке $z_0 = \frac{v_0 - w_0}{w_0}$, где v_0 и w_0 — скорости MKBM и фонового ветра вблизи Земли (1 а.е.). В качестве начального времени (t_0) используется время появления MKBM в СВ у Земли (например, по данным каталога R&C).

Весь диапазон от $213 R_{\odot}$ до $20 R_{\odot}$ разбивается на 4 участка: $213-165 R_{\odot}$, $165-115 R_{\odot}$, $115-65 R_{\odot}$ и $65-20 R_{\odot}$, а каждый участок — на n одинаковых отрезков, на каждом из которых скорость при обратном движении изменяется в соответствии с законом магнитодинамического торможения: расчет при $z_0 > 0$ или уменьшается при $z_0 < 0$. При $n = 10^4$ длина отрезка приблизительно равна 3100–3400 км, что при скорости 350 км/с соответствует временному шагу 9–10 с. При этом в расчете используются следующие уравнения:

$$dl_i = v_i dt_i, \quad v_i = w(z_i + 1),$$

$$dt_i = \frac{dl_i}{w(z_i + 1)}, \quad dz_i = -s_z \gamma \left(\frac{z_i^2}{z_i + 1} \right) dl_i,$$

где z_i — значение z на i -м участке, параметр $s_z = 1$ при $z_0 > 0$ и $s_z = -1$ при $z_0 < 0$, коэффициент взаимодействия γ может задаваться в диапазоне от 0.2×10^{-7} до $2 \times 10^{-7} \text{ км}^{-1}$ [14]. Численный расчет ведется рекуррентным методом: $z_i = z_{i-1} + dz$, $L_i = L_{i-1} - dl$, $L_0 = 213 R_{\odot}$.

Величина параметра z растет по модулю при приближении к Солнцу, поскольку растет модуль разности скорости KBM и фонового СВ. При $z_0 > 0$, что соответствует замедлению KBM, движущегося от Солнца, рост конечного значения z_n и v_n неограничен. Случай $z_0 < 0$ соответствует ускорению KBM, движущегося от Солнца, и при-

ближению его скорости к скорости фонового СВ. При этом возможны 2 варианта развития.

В первом варианте фоном является медленный СВ, движущийся, например, с постоянной средней скоростью $w = 350 \text{ км/с}$. Значение v_n не может быть меньше минимума наблюдаемой скорости KBM ($v_n > v_{\min}$) в рассматриваемом временном интервале (например, $v_n > v_{\min} \sim 100 \text{ км/с}$, т.к. минимальное значение средней скорости KBM по данным CACTUS за 2013–2015 гг. равно 108 км/с). При $w = 350 \text{ км/с}$ это соответствует ограничению $z_n \geq -0.7$. Скорость этих KBM меньше скорости фонового ветра, поэтому в СВ их можно выделить только по скачку магнитного поля и провалу в T_p и β . Как правило, такие KBM не являются геоэффективными, поэтому их можно исключить из прогноза.

Во втором случае, когда KBM распространяется от Солнца вслед идущему перед ним с более высокой скоростью потоку высокоскоростного СВ из корональной дыры (ВСП из КД), суммарная геоэффективность может быть значительной за счет большой скорости и сложения магнитных полей, и этот случай нельзя не учитывать в прогнозе. Таким образом, события с $z_0 < 0$ являются особым видом KBM, которые требуют дополнительного анализа.

Время транзита KBM от Солнца до Земли (t_n) рассчитывается как суммарное время прохождения всех интервалов: $t_n = \sum t_i$, $t_i = \frac{dl}{v_i} = \frac{dl}{w(z_i + 1)}$,

$$dl = \frac{L_0 - L_n}{n}.$$

Визуализация алгоритма RDBM для случаев $v_i > w_i$ и $v_i < w_i$ представлена на рис. 1. В качестве входных данных взяты: $z_0 = 0.1-10$ для $v_i > w_i$ и $z_0 = -0.22-0$ для $v_i < w_i$.

4. ТЕСТИРОВАНИЕ RDBM

Для проверки работы алгоритма RDBM была проведена идентификация солнечных источников серии MKBM за период 2013–2015 гг. Всего было выбрано 17 MKBM, для которых KBM по результатам расчета сопровождался диммингами.

Данные по MKBM, время начала (t_0) и средняя скорость (v_0), брались из каталога R&C. Скорость фонового СВ (w) для алгоритма RDBM была выбрана на основе данных моделирования скорости (v_m) квазистационарного потока плазмы из корональных дыр (КД), представленных в SMDC, а также данных из каталога ИКИ и базы OMNI. По SMDC скорость квазистационарного потока СВ пропорциональна площади КД в центральной части солнечного диска [23–25]. Из каталога ИКИ

⁵ <https://www.sidc.be/cactus>

⁶ <http://solardemon.oma.be>

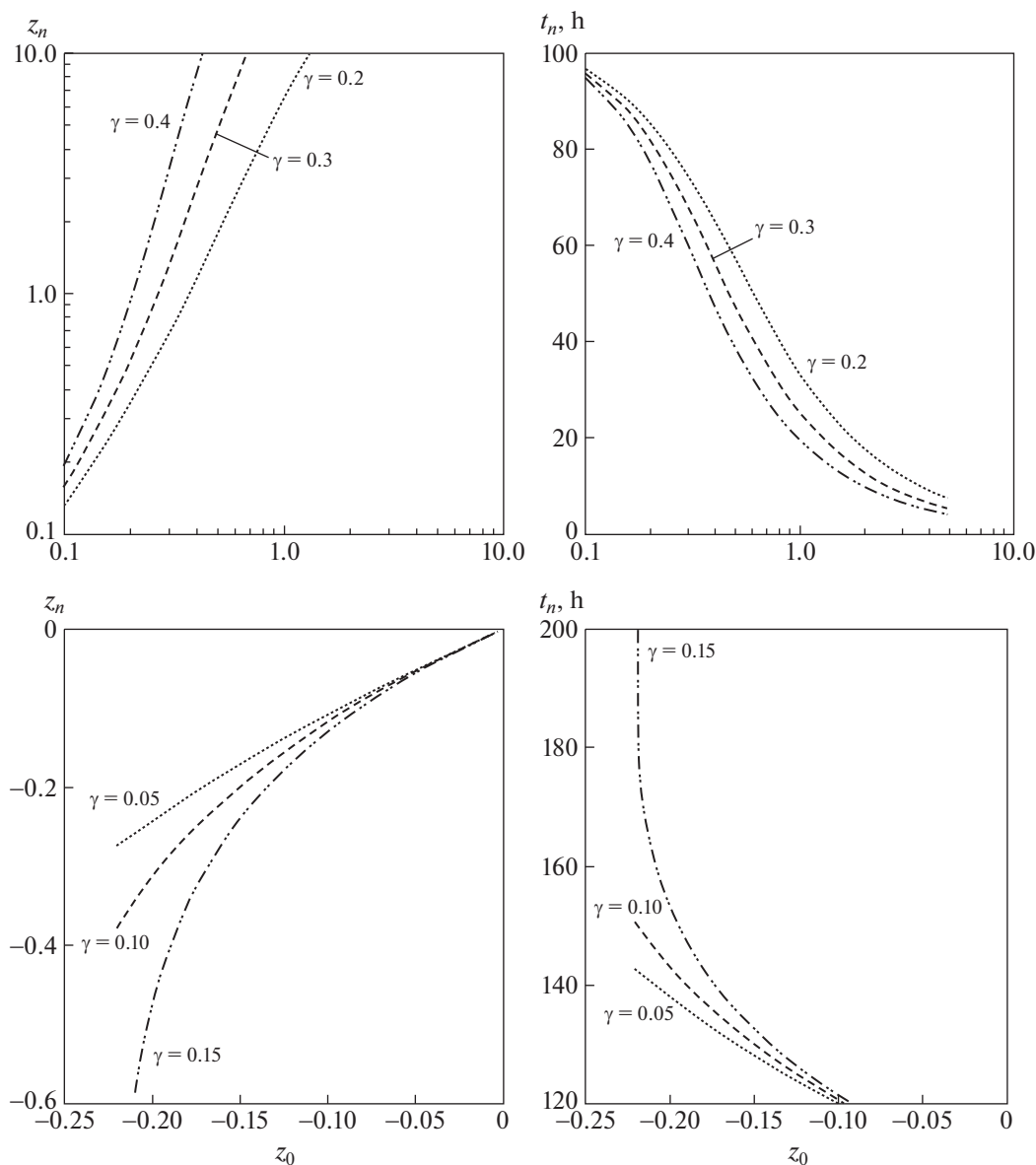


Рис. 1. Графики зависимости z_n от z_0 и t_n от z_0 для случаев $v_i > w_i$ (верхний ряд) и $v_i < w_i$ (нижний ряд) и при разных γ (в единицах 10^{-7} км^{-1}).

выбирались временные интервалы, соответствующие медленному и высокоскоростному потоку из КД (ВСП из КД) за период 2013–2015 гг., и для них по данным базы OMNI рассчитывалась средняя протонная скорость (v_p). Таким образом, при сопоставлении скоростей из SMDC и OMNI для периода 2013–2015 гг. получились следующие соотношения: в случае медленного СВ $\langle v_m/v_p \rangle = 1.15$ (15%), в случае ВСП из КД $\langle v_m/v_p \rangle = 0.90$ (10%). Для лучшего соответствия модельной скорости из SMDC со скоростью измеренного медленного СВ и для минимальной ошибки расчета по RDBM были введены поправочные коэффициенты для

модельной скорости: модельная скорость умножалась на коэффициент 0.9 и ограничивалась снизу значением 350 км/сек. При этом получаем для интервалов медленного СВ $\langle v_m/v_p \rangle = 1.09$, для ВСП из КД $\langle v_m/v_p \rangle = 0.83$. Отметим, что в периоды преобладания фоновых высокоскоростных потоков эти значения могут измениться.

В работе было рассмотрено два варианта расчета возможных источников МКВМ по RDBM. В первом варианте использовалась непостоянная ступенчатая скорость фонового СВ при расчете возможных источников МКВМ по RDBM (таким образом учитывался вклад квазистационарного

Таблица 1. Разница между расчетами времени и скорости по RDBM на R_{20} и измерениями по CACTus в зависимости от γ для варианта с (1) разделением на 4 интервала со ступенчатой фоновой скоростью w и (2) постоянной на всем интервале $w = 350$ км/с

$\gamma \times 10^{-7}, \text{ км}^{-1}$	0.25	0.3	0.33	0.35
Ступенчатая w				
$\langle \Delta T \rangle, \text{ ч}$	-3.0 ± 9.9	-1.0 ± 11.3	0.2 ± 12.3	1.0 ± 13.1
$\langle \Delta V \rangle, \text{ км/с}$	-22 ± 300	179 ± 562	373 ± 839	550 ± 1098
Постоянная $w = 350$ км/с				
$\langle \Delta T \rangle, \text{ ч}$	2.8 ± 9.7	6.0 ± 10.9	8.0 ± 11.6	9.3 ± 12.0
$\langle \Delta V \rangle, \text{ км/с}$	311 ± 530	828 ± 1110	1343 ± 1704	1818 ± 2257

ВСП из КД в фоновый СВ). Расстояние от Земли до Солнца разделялось на 4 указанных выше отрезка ($213-165 R_{\odot}$, $165-115 R_{\odot}$, $115-65 R_{\odot}$, $65-20 R_{\odot}$). Проводился поэтапный расчет: сперва рассчитывались время и скорость КВМ на $165 R_{\odot}$ (при этом начальными параметрами были средняя скорость МКВМ и время его прихода к Земле на $213 R_{\odot}$ по каталогу R&C), далее полученные данные брались для расчета времени и скорости КВМ на $115 R_{\odot}$, потом на $65 R_{\odot}$ и далее на $20 R_{\odot}$. При этом скорость фонового СВ имела ступенчатый характер, т.е. ее значение на каждом из отрезков рассчитывалось по начальной точке интервала как функция от времени. Во втором варианте скорость фонового ветра считалась постоянной на протяжении всего пути ($213-20 R_{\odot}$) и бралась равной 350 км/с (средняя скорость медленного СВ по данным OMNI за 2013 г., согласуется с [14]).

Ступенчатый характер расчета скорости КВМ позволяет, не усложняя вычисления, оценить ситуации, когда ВСП из КД догоняет медленный КВМ, ускоряя его, или, когда быстрый КВМ замедляется меньше, догоняя ВСП, чем, если бы считалось, что он распространяется все время по медленному фоновому СВ. Такие расчеты фонового ветра использовались ранее для прогноза скорости КВМ в статье [26].

Определение оптимального коэффициента взаимодействия (γ) проводилось методом сравнения результатов расчета RDBM (на R_{20}) при разных γ и w с измеренными временами и скоростями КВМ по CACTus (табл. 1). Список исходных МКВМ представлен в табл. 2. В качестве источников по каталогу CACTus выбирались соответствующие КВМ, которые по времени находились в интервале ± 24 ч от рассчитанного ожидаемого времени появления, и при этом имели угловую ширину $> 90^\circ$. Также выбранные КВМ должны были сопровождаться диммингами (по каталогу Solar Demon).

Из табл. 1 видно, что в целом вариант разделения на 4 интервала со ступенчатой w дает лучшую

точность прогноза по сравнению с постоянной $w = 350$ км/с для $\gamma \geq 0.3 \times 10^{-7} \text{ км}^{-1}$. Также для варианта с постоянной скоростью фона получаем заметно большие значения погрешностей по прогнозу скорости (например, для случая $\gamma = 0.33 \times 10^{-7} \text{ км}^{-1}$ получаем дисперсию разности скоростей порядка ± 1700 км/с для постоянной w , и приблизительно ± 800 км/с — для ступенчатой w). По-видимому, это связано с более точным учетом фона высокоскоростных потоков СВ в варианте ступенчатой модели по сравнению с вариантом постоянной скорости фона.

Значение коэффициента γ , при котором наблюдалась наименьшая средняя разница по времени между расчетом и измерением ($\langle \Delta T \rangle = \min$), оказалось равным $0.33 \times 10^{-7} \text{ км}^{-1}$ при ступенчатой скорости фона СВ. Схожее значение упоминалось в [27]. При этом оптимальное значение γ для скорости КВМ несколько меньше.

В дальнейшем более подробно был рассмотрен RDBM-расчет источников МКВМ при коэффициенте $\gamma = 0.33 \times 10^{-7} \text{ км}^{-1}$. В табл. 2 приведены параметры исходных МКВМ у Земли по каталогу R&C, начальное значение модельной скорости фонового СВ в ступенчатой модели и значения безразмерного параметра z .

В табл. 3 представлены полученные ожидаемые времена появления вероятного источника на расстоянии $20 R_{\odot}$ (R_{20}) от солнечной поверхности и скорости, а также определенные в соответствие им КВМ из каталога CACTus.

Вычислялись средние значения разностей между расчетом и измерением (CACTus) для времени ($\Delta T = T_{R20} - T_{\text{CACTus}}$) и скорости ($\Delta V = V_{R20} - V_{\text{CACTus}}$). Были получены величины средних отклонений по времени и скорости с учетом знака разности ($-/+$ — раньше/позже, быстрее/медленнее). Для случая со ступенчатой скоростью фона получены: средние ошибки $\langle \Delta T \rangle = 0.2 \pm 12.3$ ч, $\langle \Delta V \rangle = 373 \pm 839$ км/с. Для случая с постоянной скоростью (350 км/с на всем отрезке

Таблица 2. Данные расчета по RDBM для $\gamma = 0.33 \times 10^{-7} \text{ км}^{-1}$: T_0 , v_0 — время появления и средняя скорость МКВМ в точке L1 около Земли (по каталогу R&C), w_{0_1} , z_{0_1} — начальные значения модельной скорости фонового СВ и соответствующего параметра z_0 для случая ступенчатой модели, z_{0_2} — значение параметра z_0 для случая постоянной $w = 350 \text{ км/с}$, z_{n_1} , z_{n_2} — конечные значения параметров z на расстоянии $20 R_\odot$ от Солнца для случаев ступенчатой модельной скорости фонового СВ и $w = 350 \text{ км/с}$

№ МКВМ	T_0 , UT	v_0 , км/с	w_{0_1} , км/с	z_{0_1}	z_{0_2}	z_{n_1}	z_{n_2}
1	17.03.2013 15:00	520	374	0.39	0.49	3.67	6.11
2	14.04.2013 17:00	410	379	0.08	0.17	0.28	0.43
3	13.07.2013 05:00	430	350	0.23	0.23	0.82	0.82
4	23.08.2013 20:00	470	410	0.15	0.34	0.02	2.37
5	02.10.2013 23:00	470	386	0.22	0.34	0.66	2.37
6	16.02.2014 05:00	380	350	0.09	0.09	0.13	0.13
7	17.02.2014 03:00	400	350	0.14	0.14	0.3	0.3
8	21.02.2014 02:00	490	403	0.22	0.4	2.41	3.62
9	21.04.2014 07:00	540	385	0.4	0.54	3.78	8.14
10	12.09.2014 22:00	600	381	0.57	0.71	10.5	15.7
11	17.03.2015 13:00	560	377	0.49	0.6	3.96	10.4
12	10.04.2015 13:00	380	433	−0.12	0.09	−0.24	0.13
13	23.06.2015 02:00	610	499	0.22	0.74	1.11	17.1
14	25.06.2015 10:00	550	403	0.36	0.57	3.45	9.26
15	15.08.2015 21:00	500	442	0.13	0.43	0.23	4.37
16	07.11.2015 06:00	500	350	0.43	0.43	4.21	4.37
17	20.12.2015 03:00	400	367	0.09	0.14	0.04	0.3

Таблица 3. Сравнение параметров КВМ, полученных с помощью RDBM (при $\gamma = 0.33 \times 10^{-7} \text{ км}^{-1}$), с параметрами, экстраполированными из CACTus. T_{R20_1} , V_{R20_1} — рассчитанное время и скорость на $20 R_\odot$ при ступенчатой фоновой скорости; T_{R20_2} , V_{R20_2} — рассчитанное время и скорость на $20 R_\odot$ при постоянной фоновой скорости (350 км/с) на всем отрезке $213\text{--}20 R_\odot$; T_{CACTus} , V_{CACTus} — экстраполированное по данным CACTus время появления КВМ и его скорость на $20 R_\odot$

№ МКВМ	T_{CACTus} , UT	T_{R20_1} , UT	T_{R20_2} , UT	V_{CACTus} , км/с	V_{R20_1} , км/с	V_{R20_2} , км/с
1	15.03.2013 10:14	15.03.2013 11:52	15.03.2013 17:22	1016	1633	2488
2	11.04.2013 11:25	11.04.2013 00:34	11.04.2013 04:30	809	448	500
3	09.07.2013 23:17	10.07.2013 1:05	10.07.2013 01:05	392	637	636
4	21.08.2013 11:01	20.08.2013 14:04	21.08.2013 07:57	513	488	1179
5	30.09.2013 02:26	29.09.2013 23:40	30.09.2013 10:56	767	641	1179
6	12.02.2014 13:13	12.02.2014 04:29	12.02.2014 04:29	441	395	395
7	12.02.2014 17:08	13.02.2014 10:18	13.02.2014 10:19	653	455	455
8	18.02.2014 04:56	18.02.2014 14:39	18.02.2014 20:26	926	1194	1618
9	18.04.2014 16:16	19.04.2014 6:29	19.04.2014 13:36	1080	1821	3198
10	10.09.2014 20:54	11.09.2014 9:48	11.09.2014 13:50	994	4013	5844
11	15.03.2015 05:20	15.03.2015 16:48	15.03.2015 23:11	982	2163	4001
12	07.04.2015 01:55	06.04.2015 00:18	06.04.2015 12:29	474	295	395
13	21.06.2015 05:12	20.06.2015 23:20	21.06.2015 18:59	1190	1055	6347
14	22.06.2015 21:44	23.06.2015 6:51	23.06.2015 18:27	982	1558	3589
15	12.08.2015 20:09	12.08.2015 20:11	13.08.2015 18:20	624	530	1880
16	04.11.2015 19:08	05.11.2015 2:47	05.11.2015 3:20	652	1823	1880
17	16.12.2015 13:43	16.12.2015 06:19	16.12.2015 10:19	716	405	455
Ср. откл.	$\langle \Delta T \rangle$, ч	0.2 ± 12.3	8.0 ± 11.6	$\langle \Delta V \rangle$, км/с	373 ± 839	1343 ± 1704

Таблица 4. Сравнение времени начала димминга по Solar Demon (T_1), расчетного времени появления источника на поверхности Солнца по RDBM (T_{2-1} для ступенчатой, T_{2-2} для постоянной фоновой скорости) и экстраполяции времени начала KBM по CACTus на R_0 (T_3)

№	T_1 , UT	T_{2-1} , UT	T_{2-2} , UT	T_3 , UT	$T_3 - T_1$, ч	$T_1 - T_{2-1}$, ч	$T_1 - T_{2-2}$, ч
1	15.03.2013 06:04	15.03.2013 7:08	15.03.2013 14:16	15.03.2013 05:40	0.4	1.07	8.2
2	11.04.2013 07:00	10.04.2013 07:19	10.04.2013 13:03	11.04.2013 05:41	1.3	-23.68	-17.95
3	09.07.2013 14:08	09.07.2013 12:57	09.07.2013 12:56	09.07.2013 11:27	2.7	-1.18	-1.19
4	21.08.2013 03:22	19.08.2013 22:15	21.08.2013 1:23	21.08.2013 01:59	1.4	-29.11	-1.97
5	29.09.2013 21:22	29.09.2013 11:36	30.09.2013 4:23	29.09.2013 20:22	1.0	-9.76	7.02
6	12.02.2014 04:24	11.02.2014 08:56	11.02.2014 08:56	12.02.2014 02:41	1.7	-19.46	-19.46
7	12.02.2014 12:04	12.02.2014 17:20	12.02.2014 17:20	12.02.2014 10:01	2.1	5.27	5.27
8	18.02.2014 00:44	18.02.2014 8:11	18.02.2014 15:40	17.02.2014 23:55	0.8	7.45	14.93
9	18.04.2014 12:46	19.04.2014 02:14	19.04.2014 11:11	18.04.2014 11:59	0.8	13.47	22.43
10	10.09.2014 17:26	11.09.2014 7:52	11.09.2014 12:30	10.09.2014 16:14	1.2	14.45	19.08
11	15.03.2015 00:48	15.03.2015 13:14	15.03.2015 21:15	15.03.2015 00:37	0.2	12.44	20.46
12	06.04.2015 18:42	04.04.2015 22:07	05.04.2015 16:56	06.04.2015 16:08	2.6	-44.58	-25.76
13	21.06.2015 01:40	20.06.2015 16:01	21.06.2015 17:46	21.06.2015 01:17	0.4	-9.65	16.1
14	22.06.2015 18:06	23.06.2015 1:54	23.06.2015 16:18	22.06.2015 17:01	1.1	7.8	22.21
15	12.08.2015 14:08	12.08.2015 05:36	13.08.2015 14:13	12.08.2015 12:43	1.4	-8.52	24.1
16	04.11.2015 13:42	04.11.2015 22:32	04.11.2015 23:13	04.11.2015 12:01	1.7	8.84	9.53
17	16.12.2015 08:04	15.12.2015 11:14	15.12.2015 17:20	16.12.2015 07:14	0.8	-20.83	-14.73
Среднее значение разницы					1.3 ± 0.7	-5.6 ± 17.1	5.2 ± 16.2

213–20 R_0): $\langle \Delta T_2 \rangle = 8.0 \pm 11.6$ ч, $\langle \Delta V_2 \rangle = 1343 \pm 1704$ км/с.

Величины на R_{20} (для ступенчатой и постоянной фоновой скорости СВ) были далее экстраполированы на поверхность Солнца (R_0) (см. табл. 4) с допущением того, что средняя скорость KBM от R_0 до R_{20} может быть оценена как $V_{R20}/2$. Время на R_0 сравнивалось со списком диммингов из каталога Solar Demon. При этом критерии отбора диммингов, сопровождавших KBM, были следующие: 1) минимальная разница во времени измерения и расчета; 2) расположение вблизи центра солнечного диска ($\pm 25^\circ$ по широте, $\pm 35^\circ$ по долготе), в направлении Земли; 3) с наиболее сильным падением в интенсивности.

Выделенные таким образом димминги (табл. 4) в основном лежат в 24-часовом интервале от расчетных времен со средней разницей: 1) $-5.6 \pm \pm 17.1$ ч – для ступенчатой фоновой скорости и 2) 5.2 ± 16.2 ч – для постоянного фона. Все найденные димминги располагаются в пределах центральной части диска: от -25° до 17° по широте и от -31° до 35° по долготе. Экстраполированное на R_0 время начала KBM по CACTus в среднем лежит в пределах 2 ч от начала диммингов по Solar Demon.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе описаны основные принципы работы алгоритма RDBM при идентификации солнечных источников MKBM. На примере периода 2013–2015 гг. было проведено тестирование путем сравнения RDBM расчетов со значениями, представленными в каталогах CACTus и Solar Demon.

Было получено, что оптимальное значение параметра взаимодействия γ , при котором наблюдается наименьшая средняя разница по времени между расчетом и измерением, оказалось равным 0.33×10^{-7} км $^{-1}$ (что согласуется с [27]). По скорости оптимальное значение γ несколько меньше.

Были рассмотрены 2 варианта расчета для $\gamma = 0.33 \times 10^{-7}$ км $^{-1}$: 1) с переменной (ступенчатой) скоростью фоновой СВ (w) с делением расстояния от точки L1 у Земли до точки R_{20} у Солнца на 4 интервала, 2) с постоянной на всей траектории фоновой скоростью ($w = 350$ км/с). Вариант деления на 4 интервала со ступенчатой w дает лучшую точность прогноза по сравнению с вариантом постоянной $w = 350$ км/с. Расчет со ступенчатой скоростью фона дает меньшие ошибки из-за лучшего учета влияния высокоскоростных потоков СВ. Анализ показывает, что вариант расчета с постоянной скоростью дает более высокую точность при скорости MKBM $v_0 < 400$ км/с, близкой к средней скорости медлен-

ного СВ. При $v_0 > 500$ км/с более точные результаты показывает вариант с модельной скоростью фонового СВ, в котором учитываются высокоскоростные потоки от КД.

Для $\gamma = 0.33 \times 10^{-7}$ км $^{-1}$ сравнение времени начала димминга по Solar Demon, расчетного времени по RDBM показывает, что варианты с модельной скоростью фона и с постоянной скоростью 350 км/с дают примерно одинаковую точность порядка 5 ч, причем при модельной скорости эта разница отрицательна (расчет запаздывает), а при постоянной скорости — положительна (расчет опережает).

В целом результаты показывают, что по измерениям у Земли параметрам МКВМ с помощью алгоритма RDBM эффективно идентифицируются наиболее вероятные КВМ-источники и определяются их параметры на выходе из солнечной короны. Таким образом, RDBM является полезным инструментом для уточнения начальных параметров прямых моделей прогноза (в частности, по методике SMDC).

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность научному коллективу Центра анализа космической погоды НИИЯФ МГУ, создателям каталога солнечных событий ИКИ, каталога МКВМ Ричардсону и Кейн, а также составителям баз OMNI, CACTus и Solar Demon за предоставление доступа к данным.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *I. G. Richardson and H. V. Cane*, J. Geophys. Res. **109**, A09104 (2004).
2. *Ю. И. Ермолаев, Н. С. Николаева, И. Г. Лодкина, М. Ю. Ермолаев*, Космич. исслед. **47**, 99–113 (2009).
3. *I. G. Richardson and H. V. Cane*, Solar Phys. **264**, 189–237 (2010).
4. *H. S. Hudson and E. W. Cliver*, J. Geophys. Res. **106**, 25199 (2001).
5. *В. А. Слемзин, Ю. С. Шугай*, Космич. исслед. **53**, 51 (2015).
6. *R. A. Harrison, P. Bryans, G. M. Simnett, and M. Lyons*, Astron. and Astrophys. **400**, 1071–1083 (2003).
7. *K. Dissauer, A. M. Veronig, M. Temmer, and T. Podladchikova*, Astrophys. J. **874**, 123 (2019).
8. *D. M. Rust and E. Hildner*, Solar Phys. **48**, 381–387 (1976).
9. *H. S. Hudson, J. R. Lemen, O. C. St. Cyr, A. C. Sterling, and D. F. Webb*, Geophys. Res. Lett. **25**, 2481–2484 (1998).
10. *B. Vršnak*, Solar Phys. **202**, 173 (2001).
11. *B. Vršnak and N. Gopalswamy*, J. Geophys. Res.: Space Phys. **107**, 1019 (2002).
12. *P. J. Cargill*, Solar Phys. **221**, 135 (2004).
13. *B. Vršnak and T. Žic*, Astron. and Astrophys. **472**, 937 (2007).
14. *B. Vršnak, T. Žic, D. Vrbanec, M. Temmer, T. Rollett, C. Möstl, A. Veronig, J. Calogovic, M. Dumbovic, S. Lulic, Y.-J. Moon, and A. Shanmugaraju*, Solar Phys. **285**, 295 (2013).
15. *B. Vršnak*, J. Space Weather Space Clim. **11**, 34 (2021).
16. *M. Dumbovic, J. Calogovic, K. Martinic, B. Vrsnak, D. Sudar, M. Temmer, and A. Veronig*, Frontiers in Astronomy and Space Sciences **8**, 58 (2021).
17. *B. Vršnak, D. Ruždjak, D. Sudar, and N. Gopalswamy*, Astron. and Astrophys. **423**, 717–728 (2004).
18. *A. Vourlidas, S. Patsourakos, and N. P. Savani*, Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences **377**, 20180096 (2019).
19. *Y. Shugay, V. Kalegaev, K. Kaportseva, V. Slemzin, D. Rodkin, and V. Eremeev*, Universe **8**, 565 (2022).
20. *G. E. Brueckner, R. A. Howard, M. J. Koomen, C. M. Korendyke, D. J. Michels, J. D. Moses, D. G. Socker, K. P. Dere, P. L. Lamy, A. Llebaria, M. V. Bout, R. Schwenn, G. M. Simnett, D. K. Bedford, and C. J. Eyles*, Solar Phys. **162**, 357–402 (1995).
21. *E. Robbrecht and D. Berghmans*, Astron. and Astrophys. **425**, 1097–1106 (2004).
22. *E. Kraaikamp and C. J. Verbeek*, Space Weather Space Clim. **5**, A18 (2015).
23. *Ю. С. Шугай, И. С. Веселовский, Д. Б. Ситон, Д. Бергманс*, Астрон. вестник **45**, 560–571 (2011).
24. *S. J. Hofmeister, A. Veronig, M. Temmer, S. Vennerstrom, B. Heber, and B. Vršnak*, J. Geophys. Res.: Space Phys. **123**, 1738–1753 (2018).
25. *Ю. С. Шугай*, Метеорология и гидрология **3**, 58–66 (2021).
26. *Ю. С. Шугай, К. Б. Канорцева*, Геомагнетизм и аэронавигация **61**, 148–159 (2021).
27. *J. Čalogović, M. Dumbović, D. Sudar, B. Vršnak, K. Martinić, M. Temmer, and A. Veronig*, Solar Phys. **296**, 114 (2021).