

УДК 524.52

СКОРОСТЬ ЛОКАЛЬНОЙ МЕЖЗВЕЗДНОЙ СРЕДЫ ОТНОСИТЕЛЬНО СОЛНЦА ПО ДАННЫМ ИЗМЕРЕНИЙ ПОТОКОВ МЕЖЗВЕЗДНОГО ГЕЛИЯ НА АППАРАТАХ Ulysses И IBEX

© 2014 г. О. А. Катушкина^{1,2*}, Е. А. Проворникова^{1,2,3}, В. В. Измоленов^{1,2}

¹Институт космических исследований РАН, Москва

²Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

³Boston University, USA

Поступила в редакцию 24.07.2013 г.

Рассматривается вопрос об определении относительной скорости локальной межзвездной среды (ЛМС) на основании прямых измерений потоков межзвездных атомов гелия в Солнечной системе. Такие измерения проводились на космическом аппарате Ulysses в 1990–2007 г. на расстоянии 2–5 а.е. от Солнца, а также проводятся с 2009 г. и по настоящее время на аппарате Interstellar Boundary Explorer (IBEX) на орбите Земли. Недавние работы по анализу измерений IBEX показали, что скорость ЛМС относительно Солнца, определенная из данных IBEX, отличается по величине (на ≈ 3 км/с) и направлению (на $\approx 4^\circ$) от скорости ЛМС, полученной ранее в работе Витте на основании измерений Ulysses. В данной работе проведено моделирование данных Ulysses (в том числе данных 2007 г., которые ранее никем не рассматривались) с учетом различных векторов скорости ЛМС, а также сравнение результатов численного моделирования с экспериментальными данными. Показано, что вектор скорости ЛМС, полученный из данных IBEX, противоречит данным Ulysses по положению на карте неба максимума измеряемых потоков межзвездных атомов гелия. Кроме того, показано, что положение максимума потоков определяется исключительно вектором скорости ЛМС и не зависит от других параметров модели (температуры ЛМС и частоты ионизации). Это означает, что в рамках имеющихся моделей с вектором скорости ЛМС из данных IBEX невозможно объяснить данные Ulysses (в том числе данные 2007 г., полученные всего за 2 года до измерений IBEX). Обсуждаются возможные причины обнаруженных противоречий.

Ключевые слова: нейтральные атомы гелия, локальная межзвездная среда, гелиосфера.

DOI: 10.7868/S0320010814010021

ВВЕДЕНИЕ

Солнце и Солнечная система окружены так называемой локальной межзвездной средой (ЛМС), представляющей собой частично ионизованную плазму. Основным нейтральным компонентом ЛМС являются атомы водорода, также в составе ЛМС присутствуют в меньшем количестве атомы гелия и других элементов. Солнце движется относительно ЛМС со скоростью примерно 20–30 км/с. Сверхзвуковой поток солнечного ветра взаимодействует с заряженным компонентом межзвездной плазмы, в результате чего образуется область гелиосферного ударного слоя, подробнее о которой можно прочитать в работе Баранова и Маламы (1993). Длина свободного пробега межзвездных атомов сравнима с характерным

размером гелиосферы (см., например, Измоленов и др., 2001), поэтому межзвездные атомы проникают через гелиосферный ударный слой внутрь Солнечной системы, где они исследуются прямыми или косвенными методами. Внутри гелиосферы межзвездные нейтральные атомы являются основным источником информации о параметрах межзвездной среды, поскольку заряженные частицы ЛМС не проникают в гелиосферу напрямую из-за взаимодействия с солнечным ветром.

Несмотря на то что концентрация атомов водорода в межзвездной среде является максимальной по сравнению с другими элементами, измерения потоков межзвездных атомов H в гелиосфере неудобно использовать для удаленной диагностики параметров ЛМС. Это связано с тем, что в гелиосферном ударном слое атомы водорода взаимодействуют с протонами через процесс перезарядки ($H + H^+ \leftrightarrow H^+ + H$), в результате которого

* Электронный адрес: okat@iki.rssi.ru

рождаются так называемые вторичные межзвездные атомы водорода. Параметры вторичных атомов зависят от локальных свойств плазмы в области их рождения. Таким образом, распределение межзвездных (смеси первичных и вторичных) атомов водорода в гелиосфере значительно отличается от первоначального распределения в межзвездной среде. Поэтому использовать измеряемые, например, на орбите Земли параметры атомов водорода для определения скорости и температуры ЛМС крайне затруднительно, так как для этого нужно учитывать изменения функции распределения атомов за счет перезарядки, происходящие вблизи границы гелиосферы (Катушкина, Измоденов, 2010, 2011).

В отличие от атомов водорода, межзвездные атомы гелия проникают в гелиосферу свободно, практически не взаимодействуя с протонами из-за малого сечения перезарядки и большого потенциала ионизации. Поэтому данные измерений параметров атомов гелия в Солнечной системе удобно использовать для определения температуры (T_{LISM}) и вектора средней скорости (\mathbf{V}_{LISM}) ЛМС относительно Солнца. Внутри гелиосферы атомы гелия подвергаются воздействию силы гравитационного притяжения к Солнцу, а также фотоионизации и ионизации электронным ударом. Частоты указанных процессов ионизации известны из различных измерений солнечного излучения и солнечного ветра (см., например, Макмаллин и др., 2004; Бзовский и др., 2012). Чтобы определить параметры ЛМС из локальных измерений потоков атомов гелия внутри гелиосферы, необходимо использовать теоретическую модель, учитывающую процессы ионизации атомов и гравитационное притяжение к Солнцу, и решать обратную задачу, подбирая параметры ЛМС так, чтобы получить наилучшее совпадение между экспериментальными данными и результатами численных расчетов.

Описанная методика применялась для определения параметров ЛМС по данным измерений потоков межзвездных атомов гелия на космическом аппарате (КА) *Ulysses* прибором *GAS* и подробно описана в работах Банашкевича и др. (1996), Витте и др. (1993, 1996), Витте (2004). Прибор *GAS* предназначен специально для измерения потоков межзвездных нейтральных атомов гелия в межпланетном пространстве Солнечной системы. Измерения проводились с 1990 г. по 2007 г., однако до настоящего времени были проанализированы только данные до 2002 г. включительно (Витте, 2004). Анализ данных *Ulysses*, проведенный в работе Витте (2004), позволил получить следующие параметры ЛМС: концентрация атомов гелия $n_{\text{He,LISM}} = 0.015 \pm 0.003 \text{ см}^{-3}$,

температура $T_{\text{LISM}} = 6300 \pm 340 \text{ К}$, скорость относительно Солнца $V_{\text{LISM}} = 26.3 \pm 0.4 \text{ км/с}$ и направление вектора скорости определяются в эклиптической (J2000) системе координат долготой $\lambda_{\text{LISM}} = 75.4^\circ \pm 0.5^\circ$ и широтой $\beta_{\text{LISM}} = -5.2^\circ \pm 0.2^\circ$. Эти параметры ЛМС до недавнего времени находились в хорошем согласовании с другими экспериментальными данными, как следует из работ Мебиус и др. (2004) и Лаллемент и др. (2004).

В октябре 2008 г. был запущен новый КА NASA — *Interstellar Boundary Explorer* (IBEX) (Маккомас и др., 2009). Основной целью данной миссии является исследование трехмерной структуры границы гелиосферы с помощью измерений на орбите Земли потоков энергичных нейтральных атомов (ЭНА) водорода, гелия и кислорода. ЭНА образуются в результате перезарядки межзвездных атомов на ускоренных солнечных и межзвездных протонах в области гелиосферного ударного слоя. Однако помимо ЭНА прибор IBEX-Lo способен также измерять и низкоэнергичные межзвездные атомы с энергиями от 0.01 кэВ до 2 кэВ.

Данные IBEX-Lo по измерениям потоков межзвездных атомов гелия в 2009–2010 гг. были проанализированы в работах Бзовского и др. (2012) и Мёбиуса и др. (2012). Исследование Бзовского и др. было основано на применении кинетической модели распределения атомов гелия. Эта модель аналогична модели, использованной Витте (2004) для анализа данных *Ulysses/GAS*, но учитывает более современные данные о временных и гелиоширотных вариациях частоты ионизации атомов гелия. В работе Мёбиуса и др. (2012) проведено аналитическое исследование данных IBEX-Lo в рамках стационарной осесимметричной модели (так называемой “классической горячей модели”, см. Мейер, 1977; Ву, Джадж, 1979; Лаллемент и др., 1985). В результате проведенного анализа данных IBEX-Lo были получены следующие параметры ЛМС: $T_{\text{LISM}} = 6300 \pm 390 \text{ К}$, $V_{\text{LISM}} = 23.2 \pm 0.3 \text{ км/с}$, $\lambda_{\text{LISM}} = 79^\circ \pm 0.47^\circ$, $\beta_{\text{LISM}} = -4.98^\circ \pm 0.21^\circ$ (эти величины взяты из работы Маккомаса и др. (2012), где приведены средние между результатами Бзовского и др. (2012) и Мёбиуса и др. (2012) значения параметров вместе с диапазонами ошибок).

Таким образом, видно, что скорость ЛМС, полученная из данных IBEX-Lo, на 3 км/с меньше и ее направление на несколько градусов отличается от вектора скорости ЛМС, полученного ранее на основании данных *Ulysses*. Хотя указанные различия в скорости являются не очень большими, они могут оказаться существенными для интерпретации других экспериментальных данных. В частности, новое значение скорости ЛМС стимулировало обсуждение существования головной удар-

ной волны в межзвездной среде (Маккомас и др., 2012; Занк и др., 2013). Кроме того, изменение в направлении скорости \mathbf{V}_{LISM} должно повлиять на ориентацию так называемой плоскости отклонения водорода (Лаллемент и др., 2005, 2010), которая в свою очередь определяет конфигурацию межзвездного магнитного поля, поскольку считается, что вектор индукции межзвездного магнитного поля лежит в этой плоскости. Также изменение скорости ЛМС может отразиться на глобальной структуре гелиосферного ударного слоя и на положении гелиопаузы (т.е. контактного разрыва, отделяющего заряженный компонент плазмы ЛМС от плазмы солнечного ветра). Это является крайне существенным для интерпретации данных с КА Вояджер-1 и Вояджер-2, которые в настоящее время приближаются к гелиопаузе.

Отметим, что с физической точки зрения модели, использованные в работах Витте (2004) и Бзовского и др. (2012), различаются только частотой ионизации, т.е. можно предположить, что именно частота ионизации является источником различий в параметрах ЛМС, полученных с помощью анализа данных КА Ulysses и IBEX. В данной работе проведено моделирование потоков межзвездных атомов гелия, измеренных в 2001. и 2007 г. на КА Ulysses. При этом использовались различные векторы скорости ЛМС относительно Солнца и различные частоты ионизации. Показано, что вектор скорости ЛМС из работы Маккомаса и др. (2012) не позволяет объяснить данные Ulysses ни при какой частоте ионизации.

КИНЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МЕЖЗВЕЗДНЫХ АТОМОВ ГЕЛИЯ В ГЕЛИОСФЕРЕ

Общепринятым подходом для описания распределения межзвездных атомов гелия является решение кинетического уравнения:

$$\begin{aligned} \frac{\partial f(\mathbf{r}, \mathbf{w}, t)}{\partial t} + \mathbf{w} \cdot \frac{\partial f(\mathbf{r}, \mathbf{w}, t)}{\partial \mathbf{r}} + \\ + \frac{\mathbf{F}_g(r)}{m_{\text{He}}} \cdot \frac{\partial f(\mathbf{r}, \mathbf{w}, t)}{\partial \mathbf{w}} = \\ = -\beta_{\text{ph}}(r, t, \lambda) \cdot f(\mathbf{r}, \mathbf{w}, t). \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь $f(\mathbf{r}, \mathbf{w}, t)$ — функция распределения атомов по скоростям, \mathbf{w} — вектор индивидуальной скорости атома, \mathbf{F}_g — сила гравитационного притяжения к Солнцу, m_{He} — масса атома гелия, $\beta_{\text{ph}}(r, t, \lambda)$ — частота фотоионизации, причем можно считать, что $\beta_{\text{ph}}(r, t, \lambda) \sim 1/r^2$, поскольку частота фотоионизации пропорциональна потоку солнечных фотонов,

который падает с удалением от Солнца как $1/r^2$, т.е.

$$\beta_{\text{ph}}(r, t, \lambda) = \beta_{\text{ph},E}(t, \lambda) \frac{r_E^2}{r^2},$$

где $r_E = 1$ а.е., $\beta_{\text{ph},E}(t, \lambda)$ — частота фотоионизации на расстоянии 1 а.е. от Солнца. В общем случае $\beta_{\text{ph},E}$ является функцией времени и гелиошироты (λ) из-за временных и гелиоширотных вариаций потока солнечного излучения. Однако в настоящей работе будет рассматриваться стационарная и осесимметричная постановка задачи и мы будем считать, что $\beta_{\text{ph},E} = \text{const}$.

В уравнении (1) не учтена сила радиационного отталкивания, поскольку она пренебрежимо мала для атомов гелия. Также здесь не учитываются ионизация электронным ударом и перезарядка на протонах, поскольку доминирующим ионизационным процессом в случае гелия является именно фотоионизация. Типичные значения частоты фотоионизации на расстоянии 1 а.е. составляют $1.5 \times 10^{-7} \text{ с}^{-1}$ в период солнечного максимума и $5.5 \times 10^{-8} \text{ с}^{-1}$ в период солнечного минимума (Бзовский и др., 2012). Частота ионизации электронным ударом на орбите Земли составляет примерно $1-2 \times 10^{-8} \text{ с}^{-1}$ (Макмаллин и др., 2004; Бзовский и др., 2012), что в несколько раз меньше частоты фотоионизации. Кроме того, как показано в работах Макмаллин и др. (2004) и Бзовский и др. (2012), частота ионизации электронным ударом падает с удалением от Солнца быстрее чем $1/r^2$ из-за быстрого охлаждения электронов. Таким образом, ионизация электронным ударом может быть важна только на расстояниях менее 1 а.е. от Солнца, и ее можно не учитывать при анализе данных Ulysses, который проводил измерения на расстоянии 2–5 а.е.

Внешней границей расчетной области является сфера радиуса 1000 а.е. с центром на Солнце. На таком расстоянии влияние солнечной гравитации и ионизации пренебрежимо мало, следовательно, можно считать, что на внешней границе распределение атомов гелия является невозмущенным и описывается максвелловской функцией с параметрами ЛМС:

$$\begin{aligned} f_M(\mathbf{w}) = \frac{n_{\text{He, LISM}}}{\pi \sqrt{\pi} c_s^3} \exp \left[-\frac{(\mathbf{V}_{\text{LISM}} - \mathbf{w})^2}{c_s^2} \right], \\ c_s = \sqrt{\frac{2k_b T_{\text{LISM}}}{m_{\text{He}}}}, \end{aligned}$$

здесь k_b — это постоянная Больцмана. Направление вектора \mathbf{V}_{LISM} определяется двумя сферическими углами (широтой λ_{LISM} и долготой β_{LISM}) в эклиптической (J2000) системе координат.

Способ моделирования потоков атомов гелия, измеряемых на КА Ulysses/GAS, подробно описан в работе Банашкевича и др. (1996). Прибор GAS имеет два детектора с углами раствора коллиматора $\pm 2.45^\circ$ и $\pm 3.7^\circ$. В данной работе моделировались только данные, полученные детектором с меньшим полем зрения, что позволяет более точно определять потоки в данном направлении. Прибор GAS измерял потоки межзвездных атомов гелия в различных направлениях, т.е. типичным примером данных, полученных этим прибором, является изображение части неба в потоках межзвездных атомов гелия. Отметим, что все данные прибора GAS открыты для прямого доступа на сайте <http://ufa.esac.esa.int/ufa/>. Мы не будем подробно останавливаться на технических деталях моделирования данных GAS (мы полностью основывались при моделировании на статье Банашкевича и др. (1996)). Отметим лишь, что для более корректного сравнения теоретических и экспериментальных данных необходимо учитывать при моделировании поле зрения прибора, геометрический фактор прибора, а также энергетическую эффективность. Все эти данные были взяты из работы Банашкевича и др. (1996).

Для анализа были выбраны два примера данных Ulysses, а именно части двух карт неба, полученных в 2001 г. (250-й день) и в 2007 г. (251-й день). В это время Ulysses наблюдал непосредственно максимум потоков межзвездного гелия на небе за счет подходящих соотношений между вектором скорости КА и вектором средней скорости атомов (Витте, 2004).

РЕЗУЛЬТАТЫ

В этом разделе представлены результаты моделирования данных Ulysses в рамках стационарной осесимметричной кинетической модели. Отметим, что в данной работе нас не интересовали абсолютные значения измеряемых потоков, поэтому все представленные данные будут нормированы на максимальную величину потоков для каждой карты неба. Карты неба представлены в системе координат, связанной с КА. Ось OZ этой системы координат представляет собой вектор от КА к Земле, ось OY лежит в плоскости, содержащей направления от КА к Земле и Солнцу и перпендикулярна оси OZ , ось OX образует правую тройку векторов. В построенной системе координат вводятся два сферических угла: азимут α и поднятие ϵ . Конкретный способ задания такой системы координат и выбор углов описан в работе Банашкевича и др. (1996).

Сравнение результатов численного моделирования и данных Ulysses/GAS

Рассмотрим две карты неба в потоках межзвездных атомов гелия, полученные прибором GAS на борту КА Ulysses в 2001 г. (день года — DOY = 250) и в 2007 (DOY = 251). Как отмечалось выше, мы рассматриваем только данные одного из двух детекторов прибора GAS с меньшим углом раствора коллиматора. Здесь и далее мы будем под картами неба понимать не полные карты, а части карт, которые получает Ulysses за один день измерений. Эти данные были получены со следующим угловым разрешением: $\Delta\alpha = 2.8^\circ$ и $\Delta\epsilon = 2^\circ$. Части карт, содержащие максимум измеряемых потоков, представлены на рис. 1а,б для 2001 и 2007 г. соответственно.

Моделирование данных Ulysses проводилось для двух различных векторов скорости ЛМС, полученных в работах Витте (2004) и Маккомаса и др. (2012). Вблизи максимума потоков разрешение по углам (α и ϵ) в наших численных расчетах составляет 0.2° . Это позволяет с хорошей точностью определить направление на небе, где потоки максимальны.

На рис. 1в—е показаны результаты модельных расчетов. Видно, что теоретические результаты качественно совпадают с экспериментальными данными для обоих векторов скорости ЛМС. Однако из графиков можно заметить, что направления на карте неба, соответствующие максимальным потокам (т.е. величина нормированного потока в этом направлении равна 1.0), несколько различаются для моделей с разными векторами скорости ЛМС. Чтобы количественно определить эту разницу в направлениях, поступим следующим образом. Для каждой карты найдем направление максимальных потоков: $\mathbf{r}_{0,data}$ для данных GAS и $\mathbf{r}_{0,model}$ для результатов модели. А затем для каждого модельного расчета найдем угол отклонения $\gamma = \arccos(\mathbf{r}_{0,data} \cdot \mathbf{r}_{0,model})$. В таблице приведены направления максимальных потоков и отклонения от экспериментальных данных GAS. Заметим, что из-за ограниченного углового разрешения определить направление максимальных потоков в данных Ulysses/GAS можно только со следующей точностью: $\pm 1.4^\circ$ по углу α и $\pm 1^\circ$ по углу ϵ . Для модельных расчетов мы можем определить направление максимальных потоков с точностью $\pm 0.1^\circ$ по углам α и ϵ благодаря хорошему угловому разрешению вокруг максимума.

Как видно из таблицы, направление максимума потоков, полученное для модели с учетом старого вектора скорости ЛМС из работы Витте (2004), достаточно хорошо совпадает с экспериментальными данными Ulysses/GAS (величина угла отклонения γ не превышает 1.1°). В то же время

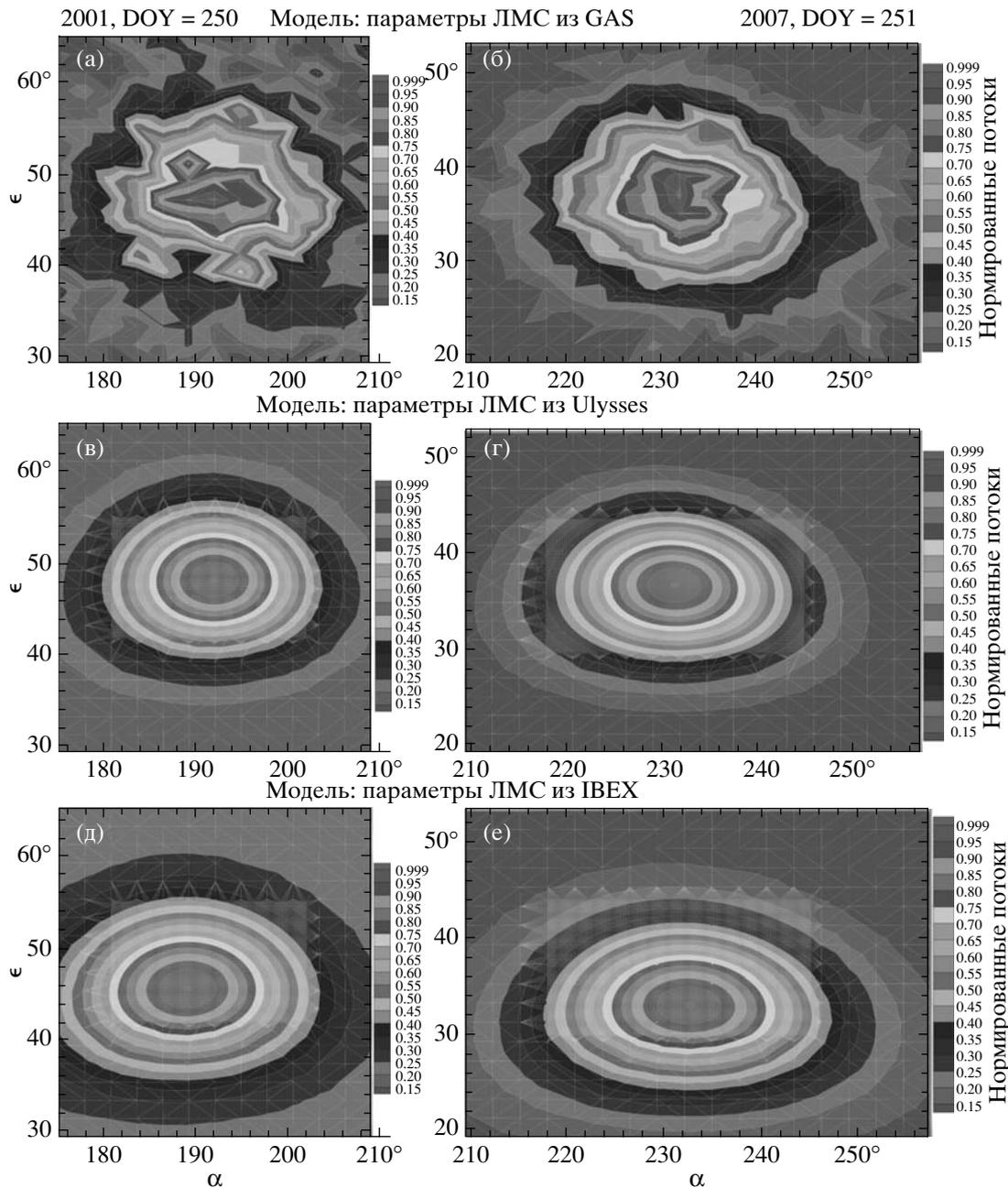


Рис. 1. (а), (б) — Данные Ulysses/GAS, полученные в 2001 и 2007 г. (в), (г) — Результаты численных расчетов с учетом вектора скорости ЛМС, полученного в работе Витте (2004) из анализа данных Ulysses/GAS за период 1990–2002 гг. (д), (е) — Результаты численных расчетов с учетом вектора скорости ЛМС, полученного в работе Маккомаса и др. (2012) из анализа данных IBEX-Lo. Все потоки нормированы на величину максимального потока для данной карты. В модели использовались следующие значения частоты фотоионизации на орбите Земли: $\beta_{\text{ph},E} = 1.5 \times 10^{-7} \text{ с}^{-1}$ для 2001 г. и $\beta_{\text{ph},E} = 7 \times 10^{-8} \text{ с}^{-1}$ для 2007 г.

модель с новым значением вектора скорости ЛМС из работы Маккомаса и др. (2012) приводит к отклонению направления максимальных потоков на несколько градусов по сравнению с данными GAS ($\gamma = 2.7\text{--}4.3^\circ$). Напомним, что эти резуль-

таты получены в рамках стационарной модели с выбранной постоянной частотой ионизации. В следующем разделе исследуется вопрос о том, какие параметры модели влияют на направление максимума потоков.

Сравнение результатов расчетов и экспериментальных данных Ulysses/GAS: направления, соответствующие максимальным потокам

Год/DOY	Данные GAS		V_{LISM} из данных Ulysses			V_{LISM} из данных IBEX		
	ϵ_0	λ_0	ϵ_0	λ_0	γ	ϵ_0	λ_0	γ
2001/250	47.30	192.15	48.4	192.0	1.10	45.6	189.2	2.73
2007/251	37.28	232.02	37.0	231.4	0.47	33.0	232.6	4.29

Результаты расчетов при различных значениях параметров модели

В стационарном осесимметричном случае параметрами модели являются: частота фотоионизации ($\beta_{ph,E}$), модуль скорости ЛМС (V_{LISM}), два угла, задающие направление скорости ЛМС (λ_{LISM} и β_{LISM}), а также температура ЛМС (T_{LISM}). В данном разделе исследуется, какие из этих параметров влияют на направление максимальных потоков межзвездных атомов гелия на карте неба.

На рис. 2 показаны результаты моделирования карты Ulysses/GAS 2001 года (DOY = 250) для различных значений частоты фотоионизации и температуры ЛМС. Частота фотоионизации варьировалась в диапазоне от 0 до $1.5 \times 10^{-6} \text{ c}^{-1}$, а температура варьировалась от 4000 К до 9000 К. Из рисунка видно, что значительные различия в частоте фотоионизации не влияют на нормированные потоки атомов гелия. Различия в температуре ЛМС, как и ожидалось, влияют на ширину максимума потоков, но не влияют на положение максимума.

На рис. 3 показаны результаты аналогичных расчетов с фиксированной температурой ЛМС и частотой фотоионизации, но различными векторами скорости V_{LISM} . Видно, что изменение модуля скорости ЛМС приводит как к изменению ширины максимума потоков, так и к изменению (в основном по углу ϵ) положения максимума. Изменение долготы λ_{LISM} приводит к смещению максимума потоков по углу α .

Таким образом, показано, что положение максимума потоков межзвездных атомов гелия на карте неба определяется исключительно вектором скорости V_{LISM} и не зависит, в частности, от частоты ионизации, используемой в модели. Помимо расчетов в рамках стационарной осесимметричной модели нами были проведены тестовые расчеты, в которых использовалась частота фотоионизации, зависящая от времени и гелиошироты. Эти расчеты также подтвердили, что никакие изменения частоты ионизации не приводят к смещению положения

максимума потоков. Это означает, что новое значение вектора скорости ЛМС, полученное из данных IBEX, противоречит данным Ulysses/GAS (в том числе данным 2007 г., полученным всего двумя годами ранее), и это противоречие не может быть ликвидировано путем изменения частоты ионизации, принятой в модели.

Определение скорости и температуры ЛМС

В последней опубликованной работе по анализу данных Ulysses/GAS (Витте, 2004) для определения параметров ЛМС использовались данные с 1990 по 2002 г. включительно (хотя прибор GAS функционировал и проводил измерения вплоть до 2007 г.). Напомним, что IBEX проводит измерения с 2009 г. В предыдущем разделе было показано, что вектор скорости, полученный из данных IBEX, по направлению максимума потоков противоречит данным Ulysses в 2007 г. Однако было бы интересно повторить анализ, проведенный ранее Витте (2004), и определить параметры ЛМС из данных Ulysses с 2003 по 2007 г. Эта работа будет предметом будущих статей. Здесь же мы ограничимся лишь достаточно грубой оценкой параметров ЛМС в 2007 г., чтобы выяснить, есть ли какие-то значительные изменения вектора скорости ЛМС, полученного из данных GAS с 2002 по 2007 г.

Для определения параметров ЛМС воспользуемся простейшим методом наименьших квадратов. А именно, зафиксировав постоянную частоту фотоионизации $\beta_{ph,E}$, будем варьировать параметры ЛМС в следующих диапазонах: V_{LISM} от 22 до 28 км/с с шагом 0.2 км/с, λ_{LISM} от 73.4° до 80.4° с шагом 0.2° , β_{LISM} от -6° до -4° с шагом 0.2° , T_{LISM} от 5000 К до 9000 К с шагом 400 К. Для каждого набора параметров ЛМС смоделируем карту Ulysses/GAS в нормированных потоках межзвездных атомов гелия и найдем величину ошибки между теоретическими и экспериментальными данными:

$$\delta = \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{(f_{model,i} - f_{data,i})^2}{N}}$$

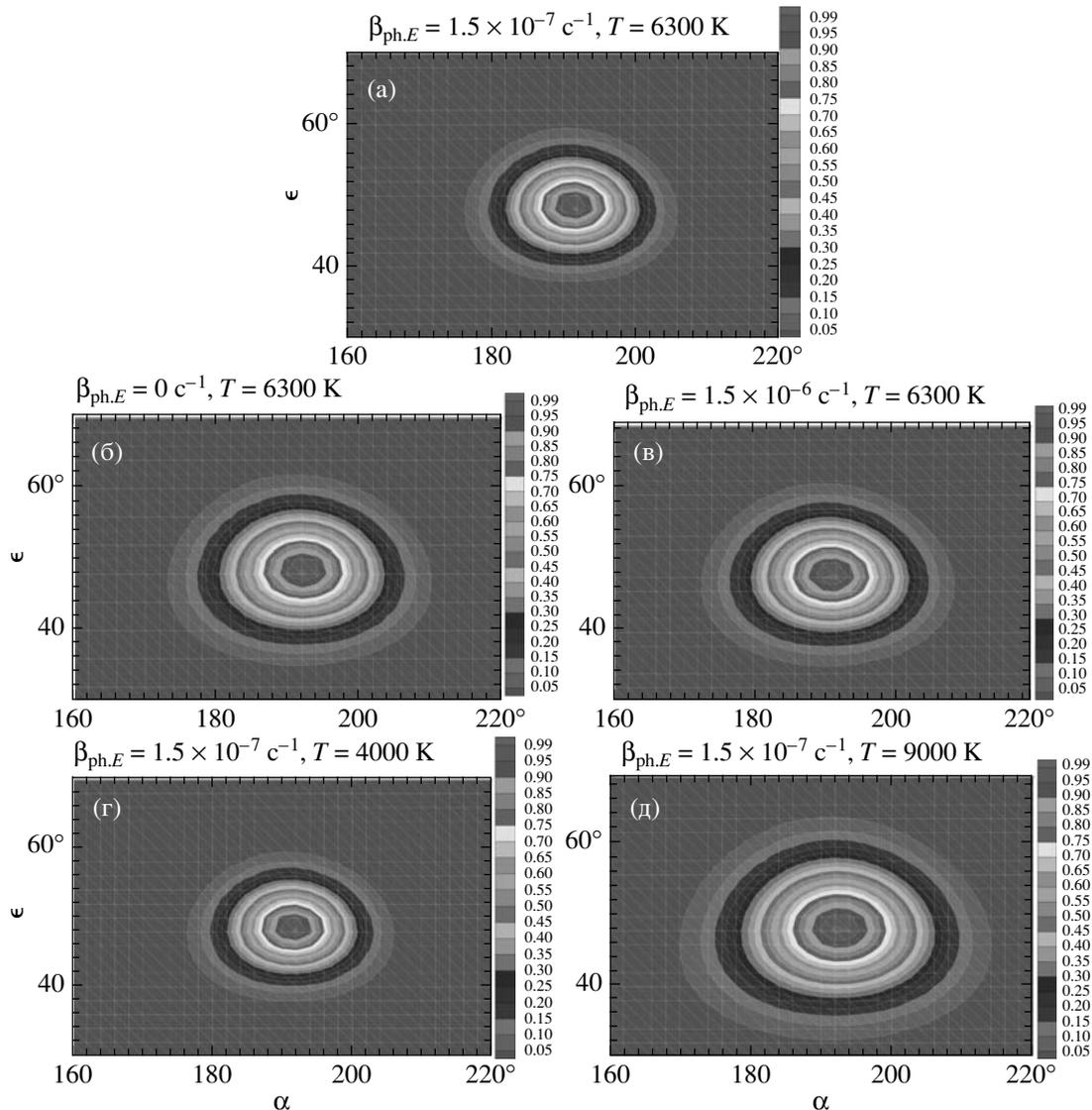


Рис. 2. Результаты расчетов потоков атомов гелия, измеренных Ulysses/GAS в 2001 г. (DOY = 250). Различные карты получены при различных значениях частоты фотоионизации ($\beta_{\text{ph},E}$) и температуры ЛМС (T_{LISM}). В этих расчетах использовался вектор скорости ЛМС, полученный в работе Витте (2004).

где N — число точек на данной карте неба, $f_{\text{model},i}$ и $f_{\text{data},i}$ — нормированные потоки в i -ом направлении, полученные по результатам модели и из данных GAS соответственно. Затем для каждой выбранной карты Ulysses/GAS находим набор параметров ЛМС ($V_{\text{LISM},0}$, $\lambda_{\text{LISM},0}$, $\beta_{\text{LISM},0}$, $T_{\text{LISM},0}$), который дает наименьшую величину ошибки δ .

Описанный алгоритм определения параметров ЛМС был применен к двум рассматриваемым нами картам Ulysses/GAS (2001 г., DOY = 250 и 2007 г., DOY = 251). Были получены следующие результаты: для 2001 г. $V_{\text{LISM},0} = 26.2$ км/с, $\lambda_{\text{LISM},0} = 74.8^\circ$, $\beta_{\text{LISM},0} = -5.5^\circ$, $T_{\text{LISM},0} = 7000$ К и для 2007 г.

$V_{\text{LISM},0} = 26.2$ км/с, $\lambda_{\text{LISM},0} = 75.1^\circ$, $\beta_{\text{LISM},0} = -5.9^\circ$, $T_{\text{LISM},0} = 7800$ К. Величина минимальной ошибки δ составляет 0.072 для 2001 г. и 0.043 для 2007 г. Видно, что в обоих случаях полученные нами векторы скорости ЛМС достаточно хорошо совпадают (и по величине, и по направлению) с вектором скорости из работы Витте (2004) и значительно отличаются от вектора скорости из работы Маккомаса и др. (2012). Несколько завышенная температура ЛМС, полученная из наших расчетов, по сравнению с результатами Витте (2004), скорее всего, говорит о несовершенстве нашего метода. Для более точного решения обратной задачи

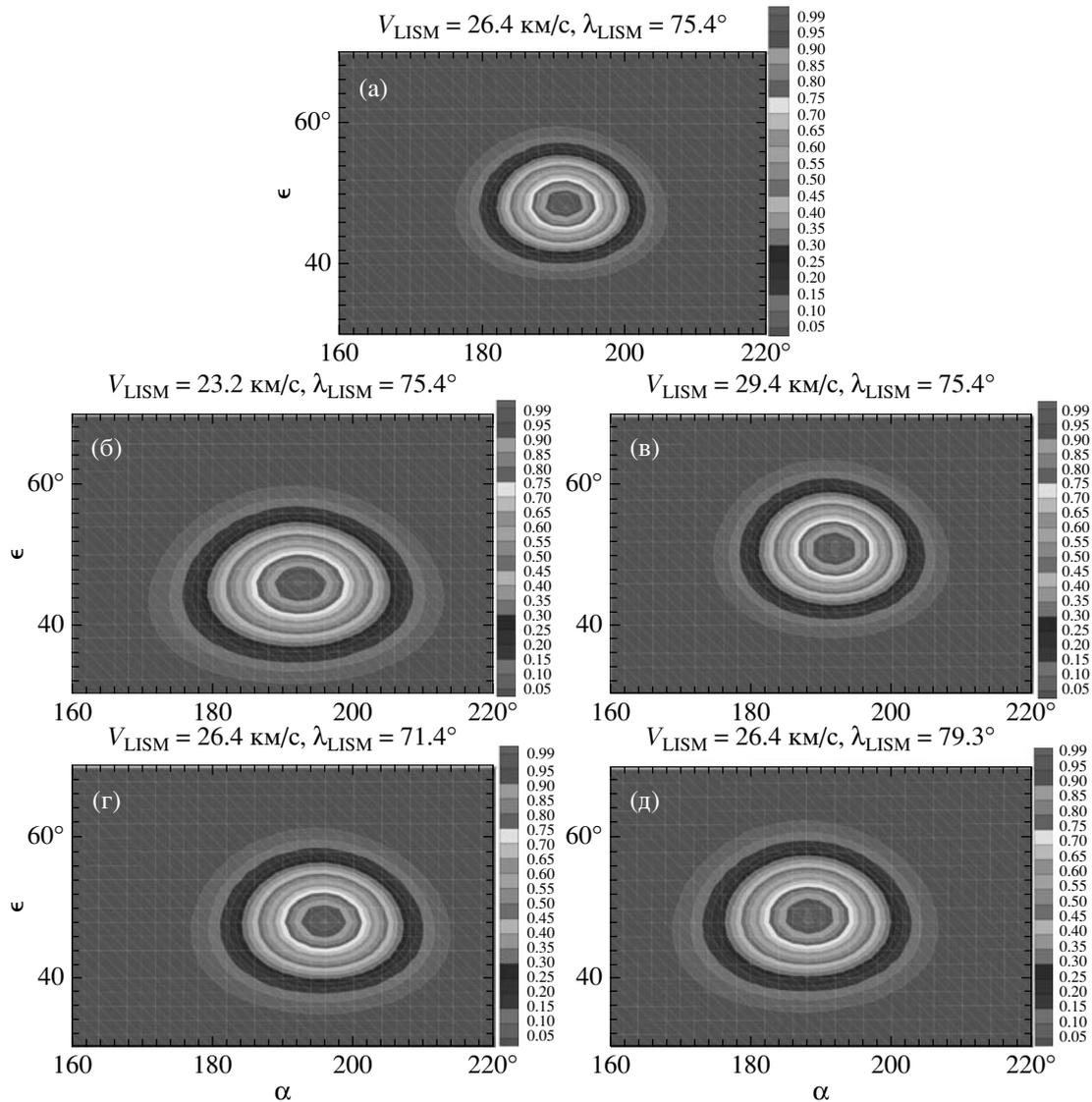


Рис. 3. Результаты расчетов потоков атомов гелия, измеренных Ulysses/GAS в 2001 г. (DOY = 250). Различные карты получены при различных значениях величины и направления (долготы) вектора скорости ЛМС (\mathbf{V}_{LISM}). В этих расчетах использовались следующие значения частоты фотоионизации и температуры ЛМС: $\beta_{\text{ph},E} = 1.5 \times 10^{-7} \text{ c}^{-1}$, $T_{\text{LISM}} = 6300 \text{ K}$.

следует использовать более сложные минимизирующие функции, простейший метод наименьших квадратов может приводить к некоторым ошибкам. Однако хорошее совпадение вектора скорости между нашими результатами для карты 2001 г. и результатами Витте (2004) говорит о том, что используемый нами метод позволяет определять вектор скорости ЛМС, который, как показано выше, зависит только от положения максимума потоков и не зависит от ширины максимума. В то же время хорошее совпадение вектора скорости ЛМС, полученного нами для карты 2007 г., с результатами для 2001 г. и результатами Витте

(2004) говорит о постоянстве вектора скорости ЛМС по данным Ulysses/GAS с 1990 по 2007 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

На основании кинетической модели был проведен анализ двух карт Ulysses/GAS в потоках межзвездных атомов гелия, полученных в 2001 и 2007 г. Данные 2007 г. анализировались впервые. Были проведены расчеты с учетом старого и нового значений вектора скорости ЛМС, полученных ранее в работах Витте (2004) и Маккомас и др.

(2012) на основании анализа данных *Ulysses/GAS* и *IBEX-Lo* соответственно. Сравнение результатов численного моделирования и экспериментальных данных *Ulysses/GAS* как для 2001 г., так и для 2007 г. показало, что новое значение вектора скорости ЛМС противоречит данным *Ulysses* по положению максимума потоков на карте неба. В то же время старое значение вектора скорости ЛМС приводит к хорошему совпадению положения максимума потоков с данными *Ulysses*.

Расчеты, проведенные для различных значений параметров модели, показали, что положение максимума потоков на карте неба зависит исключительно от вектора скорости ЛМС и не зависит от частоты ионизации, а также от температуры ЛМС, задаваемых в модели. Это позволяет сделать вывод, что полученные различия в значениях вектора скорости ЛМС между работами Витте (2004) и Маккомаса и др. (2012) не могут объясняться различными частотами ионизации, которые использовались в моделях указанных авторов.

Кроме того, с помощью метода наименьших квадратов нами были определены параметры (вектор скорости и температура) ЛМС на основании данных *Ulysses/GAS* для 2001 и 2007 г. Найденные векторы скорости ЛМС хорошо совпадают между собой, а также с результатами Витте (2004). Из этого можно сделать вывод, что данные *Ulysses/GAS* по измерениям потоков межзвездных атомов гелия свидетельствуют о постоянстве вектора скорости ЛМС с 1990 до 2007 г. В то же время известно, что анализ аналогичных измерений КА *IBEX* в период 2009–2010 гг. приводит к другому значению вектора скорости ЛМС по величине и направлению.

На наш взгляд, можно выделить две возможные причины этих различий. Во-первых, они могут быть связаны с техническими особенностями проводимых измерений, которые, возможно, некорректно учитывались при моделировании и анализе экспериментальных данных. Во-вторых, различия могут быть связаны с каким-то физическим процессом, который не рассматривался ранее в моделях. В частности, возможным кандидатом на такой процесс могут быть упругие столкновения атомов гелия с протонами солнечного ветра. Этот процесс исследовался в работах Чассефире и др. (1996) и Грунтмана (1986, 2013), где было показано, что на орбите Земли учет этого процесса приводит к уширению максимума потоков межзвездных атомов гелия. Эффективность упругих столкновений пропорциональна концентрации протонов солнечного ветра, которая падает с расстоянием от Солнца как $1/r^2$, т.е. этот процесс может быть более эффективен на расстоянии 1 а.е. от Солнца (где

проводит измерения КА *IBEX*), чем на расстояниях 2–5 а.е., где проводил измерения КА *Ulysses*.

В работе Фриша (2012) различия между векторами скорости ЛМС, полученными из данных *Ulysses* и *IBEX*, объяснялись краткосрочными изменениями параметров межзвездной среды. Однако, на наш взгляд, такие изменения маловероятны (особенно на временных масштабах двух лет от 2007 до 2009 г.), поскольку время свободного пробега атомов гелия в межзвездной среде и гелиосфере составляет порядка 10–20 лет. Следовательно, даже резкие изменения параметров ЛМС в гелиосфере должны проявляться постепенно, в течение длительного периода времени.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 12-02-31472 мол-а). Расчеты проводились с использованием суперкомпьютеров “Ломоносов” и “Чебышев” суперкомпьютерного комплекса Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Банашкевич и др. (M. Banaszkiwicz, M. Witte, and H. Rosenbauer), *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* **120**, 587 (1996).
2. Баранов, Малама (V.B. Baranov and Yu.G. Malama), *J. Geophys. Res.* **98**, 157 (1993).
3. Бзовский и др. (M. Bzowski, M.A. Kubiak, E. Möbius, et al.), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **198**, 27 (2012).
4. Витте (M. Witte), *Astron. Astrophys.* **426**, 835 (2004).
5. Витте и др. (M. Witte, M. Banaszkiwicz, and H. Rosenbauer), *Adv. Space Res.* **13**, 121 (1993).
6. Витте и др. (M. Witte, M. Banaszkiwicz, and H. Rosenbauer), *Space Sci. Rev.* **78**, 289 (1996).
7. Ву, Джадж (F.M. Wu and D.L. Juddge), *Astrophys. J.* **231**, 594 (1979).
8. Грунтман (M. Gruntman), *Planet. Space Sci.* **34**, 387 (1986).
9. Грунтман (M. Gruntman), *J. Geophys. Res.* **118**, 1366 (2013).
10. Занк и др. (G.P. Zank, J. Heerikhuisen, and V.E. Wood), *Astrophys. J.* **763**, 13 (2013).
11. Измоленов и др. (V.V. Izmodenov, M. Gruntman, and Y.G. Malama), *J. Geophys. Res.* **106**, 681 (2001).
12. Катушкина О.А., Измоленов В.В., Письма в Астрон. журн. **36**, 310 (2010) [O.A. Katushkina, V.V. Izmodenov, *Astron. Lett.* **36**, 297 (2010)].
13. Катушкина, Измоленов (O.A. Katushkina and V.V. Izmodenov), *Adv. Space Res.* **48**, 1967 (2011).
14. Лаллемент и др. (R. Lallement, J.L. Bertaux and F. Dalaudier), *Astron. Astrophys.* **150**, 21 (1985).
15. Лаллемент и др. (R. Lallement, J.C. Raymond, J. Vallergera, et al.), *Astron. Astrophys.* **426**, 875 (2004).

16. Лаллемент и др. (R. Lallement, E. Quemerais, J.L. Bertaux, et al.), *Science* **307**, 1447 (2005).
17. Лаллемент и др. (R. Lallement, E. Quemerais, D. Koutoumpa, et al.), *AIP Conf. Proc.* **1216**, 555 (2010).
18. Маккомас и др. (D.J. McComas, F. Allegrini, P. Bochsler, et al.), *Science* **326**, 959 (2009).
19. Маккомас и др. (D.J. McComas, D. Alexashov, M. Bzowski, et al.), *Science* **336**, 1291 (2012).
20. Макмаллин и др. (D.R. McMullin, M. Bzowski, and E. Möbius), *Astron. Astrophys.* **426**, 885 (2004).
21. Мейер (R.R. Meier), *Astron. Astrophys.* **55**, 211 (1977).
22. Мёбиус и др. (E. Möbius, M. Bzowski, S. Chalov, et al.), *Astron. Astrophys.* **426**, 897 (2004).
23. Мёбиус и др. (E. Möbius, P. Bochsler, M. Bzowski, et al.), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **198**, 18 (2012).
24. Фриш (P. C. Frisch), arXiv:1210.7214v2, astro-ph.GA (2012).
25. Чассефире и др. (E. Chassefiere, J.L. Bertaux, and V. Sidis), *Astron. Astrophys.* **169**, 298 (1986).