

УДК 523.165

О НЕКОТОРЫХ АСПЕКТАХ ВЛИЯНИЯ ГЛОБАЛЬНОГО ГЕЛИОСФЕРНОГО ТОКОВОГО СЛОЯ НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ ГКЛ

© 2019 г. М. Б. Крайнев¹ *, М. С. Калинин¹

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт
имени П.Н. Лебедева Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: mkrainev46@mail.ru

Поступила в редакцию 15.09.2018 г.

После доработки 06.11.2018 г.

Принята к публикации 28.01.2019 г.

Рассматривается влияние на гелиосферные характеристики, важные для распространения ГКЛ, одной из основных особенностей глобального гелиосферного токового слоя, а именно, сильной зависимости скорости солнечного ветра от расстояния до токового слоя. Предлагается простая модель скорости солнечного ветра, которая после оценки параметров по данным наблюдений может быть использована для теоретических исследований модуляции ГКЛ. Обсуждается выбор модели гелиосферных характеристик для описания поведения ГКЛ, адекватной ситуации в период низкой и средней пятнообразовательной активности Солнца.

DOI: 10.1134/S0367676519050181

ВВЕДЕНИЕ

Глобальным гелиосферным токовым слоем (ГГТС) мы называем единственный гелиосферный токовый слой (ГТС), соединяющий все долготы и существующий примерно 70–80% времени в эпохи средней и низкой пятнообразовательной активности Солнца [1, 2]. Важность ГГТС для распространения ГКЛ обусловлена двумя его свойствами: 1) ГГТС разделяет гелиосферу на два униполярных полушария по направлению гелиосферного магнитного поля (ГМП) и 2) скорость солнечного ветра (СВ) сильно зависит от углового расстояния от ГГТС [3, 4].

Стандартные модели распространения ГКЛ в гелиосфере [5] учитывают два эффекта, связанные с ГГТС: 1) магнитный дрейф частиц в униполярных полушариях и на самом ГГТС и 2) существенное изменение скорости СВ и, как следствие, характеристик ГМП и скорости дрейфа частиц с расстоянием от ГГТС. В осесимметричных моделях распространения ГКЛ, разрабатываемых нашей группой [6–8], учитываются еще два эффекта, связанные с ГГТС: 3) разный спектр флуктуаций ГМП в зоне секторной структуры и вне ее и 4) источник ГКЛ, возникающий при переходе от трехмерного по пространственным переменным (3D) транспортного уравнения для характеристик ГКЛ к усредненному по долготе (2D) уравнению.

Гелиосферные эффекты, обсуждаемые в этой статье, обусловлены влиянием ГГТС на про-

странственное поведение скорости СВ. Этим влиянием определяется как широтный, так и долготный градиенты скорости СВ, причем последний приводит к образованию корототирующих областей взаимодействия разноразмерных потоков СВ [9], изменяет спектр флуктуаций ГМП [10] и т.д. Рассмотрены подходы к построению 3D моделей СВ для использования при теоретическом изучении модуляции ГКЛ и предлагается еще одна такая модель. Затем обсуждается выбор для описания поведения ГКЛ (модели распространения ГКЛ), адекватной ситуации в период низкой и средней пятнообразовательной активности Солнца.

ГЛОБАЛЬНЫЙ ГЕЛИОСФЕРНЫЙ ТОКОВЫЙ СЛОЙ И СКОРОСТЬ СВ

В середине 1970-х годов сложилась концепция ГГТС, разделяющего гелиосферу на два полушария с униполярным ГМП в каждом, и простая модель т.н. “наклонного” ГТС (НГТС) и скорости СВ относительно него [3]. В этой модели ГТС считается большим кругом, наклоненным к плоскости гелиоэкватора на угол α_i (тилт). При этом скорость СВ остается радиальной и зависит только от магнитной широты λ (угла, отсчитываемого от плоскости ГТС как “магнитного экватора”), т.е., $\vec{V} = V(\lambda)\vec{r}_0$, где \vec{r}_0 – единичный вектор в радиальном направлении от Солнца.

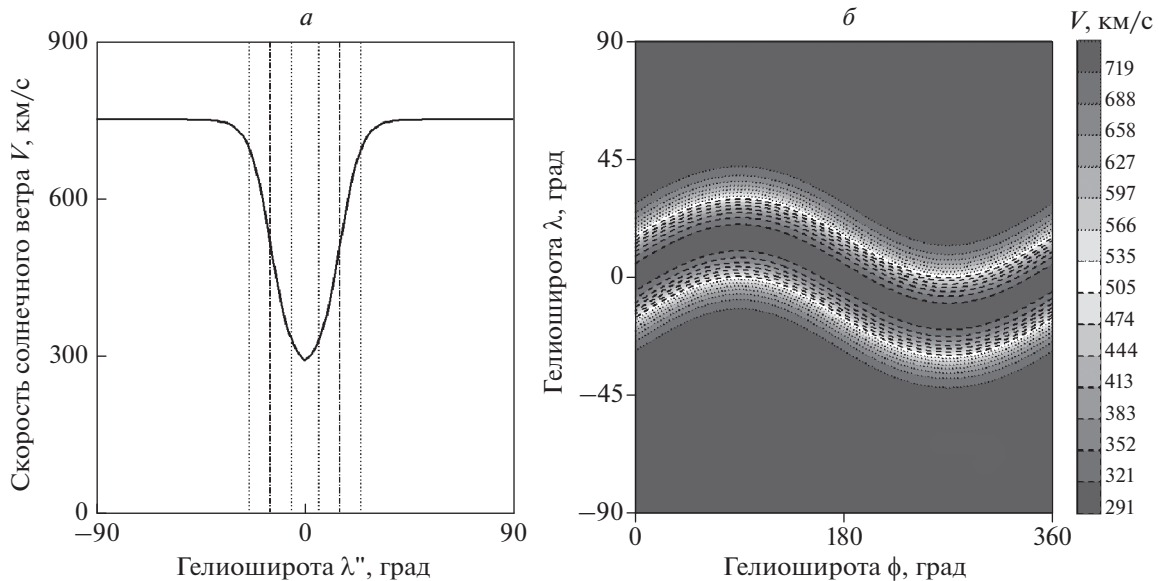


Рис. 1. Панель *a* – гелиоширотная зависимость скорости СВ в наклонной системе координат согласно выражению (3) при $V^{pol} = 750 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1}$, $V^{cs} = 275 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1}$, $\theta_{1/2} = 5^\circ$, $\Delta\theta = 9^\circ$. Штрих-пунктирными и пунктирными вертикальными линиями показаны, соответственно, середины и границы областей перехода от низкоскоростного к высокоскоростному солнечному ветру. Панель *b* – зависимость скорости СВ от долготы и широты в исходной системе координат при тех же параметрах и $\alpha_r = 15^\circ$. Соответствие между интенсивностью затемнения и типом линий и интервалами скорости показано на узкой правой панели.

Если перейти от исходной гелиоцентрической системы координат $\{r, \theta, \phi\}$ с осью вращения Солнца OZ к системе координат $\{r, \theta'', \phi''\}$ с осью OZ'' , образующей с OZ угол α_r , то

$$\cos \theta'' = \sin \phi \sin \theta \sin \alpha_r + \cos \theta \cos \alpha_r. \quad (1)$$

Если в (1) положить $\theta'' = \pi/2$, получим выражение (2) для формы ГТС $\theta^{cs}(\phi; \alpha_r)$ в исходной системе координат как большого круга, наклоненного к экватору на угол α_r :

$$\theta^{cs} = \pi/2 - \arctg(\tg \alpha_r \sin \phi). \quad (2)$$

Теперь рассмотрим, что известно о форме ГТС и насколько хорошо она описывается моделями НГТС. Общее представление о форме ГТС позволяют получить модели СМП в слое между фотосферой и т.н. поверхностью источника (внутренней поверхностью гелиосферы), например, модель потенциального СМП [11]. Пользуясь этой моделью, можно рассчитать форму изолиний $B(\theta, \phi) = 0$ или нейтральных линий на поверхности источника (НЛПИ). Многочисленные измерения ГМП в первом приближении согласуются с представлением о ГТС как вытянутой в гелиосферу солнечным ветром поверхностью, опирающейся на соответствующую НЛПИ [4]. В работе [12] было подробно рассмотрено, насколько форма расчетных НЛПИ, рассчитанных по моде-

ли [11], соответствует модели НГТС и показано, что обычно форма НЛПИ намного сложнее, чем ожидаемая по модели НГТС. Тем не менее модели ГМП и СВ, основанные на модели НГТС, широко используются, особенно при моделировании поведения в гелиосфере ГКЛ [5]. Рассмотрим еще одну такую модель.

Зададим зависимость скорости СВ от θ'' в N-полушарии основания гелиосферы в виде:

$$V(\theta'') = \frac{V^{pol} + V^{cs}}{2} - \frac{V^{pol} - V^{cs}}{2} \text{th} \left(\frac{\theta'' - \theta_{1/2}}{\Delta\theta} \right), \quad (3)$$

где V^{pol} и V^{cs} – скорость СВ на полюсе ($\theta'' = 0$) и на токовом слое ($\theta'' = \pi/2$) соответственно, а $\theta_{1/2}$ и $\Delta\theta$ определяют положение и ширину переходной области с естественным обобщением для S-полушария. Теперь, пользуясь выражением (1), можно получить зависимость скорости от направления в исходной системе координат. На левой панели (*a*) рис. 1 показана скорость СВ как функция широты в наклонной системе координат при некоторых параметрах $\{V^{pol}, V^{cs}, \theta_{1/2}, \Delta\theta\}$, а на правой панели (*b*) – карта распределения скорости СВ в исходной системе координат. Ясно, что параметры $\{V^{pol}, V^{cs}, \theta_{1/2}, \Delta\theta\}$ и их возможная зависимость от фазы солнечного цикла должны быть оценены из наблюдений.

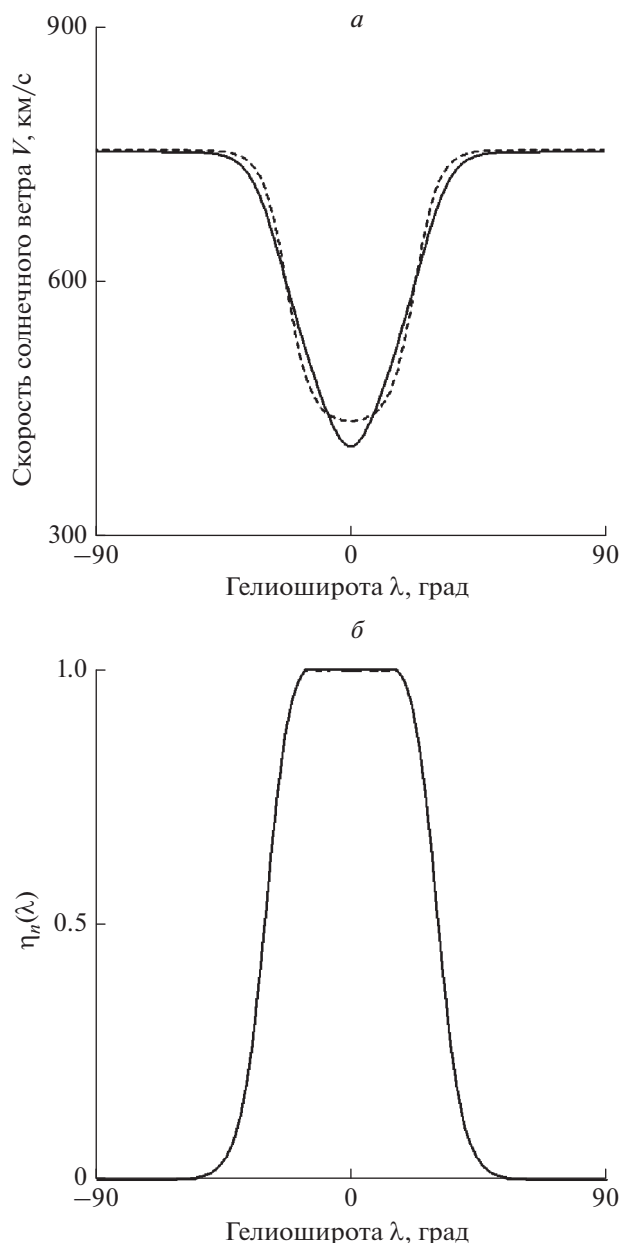


Рис. 2. Панель *a* – гелиоширотная зависимость усредненной по долготе скорости СВ в исходной системе координат тех же параметрах, что и на рис. 1 (сплошная линия), в сравнении с использованной в работах группы ЮАР [5] (штриховая линия). Панель *b* – гелиоширотная зависимость модуля долготного градиента скорости СВ, нормированного на единицу, при тех же параметрах.

ОБ АДЕКВАТНОМ ОПИСАНИИ ДОЛГОВРЕМЕННЫХ ВАРИАЦИЙ ГКЛ

Поскольку скорость СВ, а значит и другие характеристики гелиосферы могут зависеть как от широты, так и от долготы, исходное транспортное уравнение для распространения ГКЛ [13–15]

должно зависеть от трех пространственных переменных $\{r, \vartheta, \varphi\}$, т.е., быть трехмерным (3D). Обычно это уравнение формулируется для функции распределения U , связанной с интенсивностью J выражением $U(r, \theta, \varphi, p) = J(r, \vartheta, \varphi, T)/p^2$, где T и p – кинетическая энергия и импульс ГКЛ соответственно:

$$-\nabla \cdot (K \cdot \nabla U) + V_d \cdot \nabla U + V \cdot \nabla U - (\nabla \cdot V/3)(\partial U / \partial \ln p) = -\partial U / \partial t, \quad (4)$$

где K, V, V_d – зависящие от всех трех пространственных координат тензор диффузии частиц, скорости СВ и магнитного дрейфа частиц соответственно. При исследовании долговременных вариаций интенсивности ГКЛ кажется естественным использовать двумерное по пространственным переменным (2D) транспортное уравнение для усредненной по долготе функции распределения \bar{U} :

$$-\nabla \cdot (\bar{K} \cdot \nabla \bar{U}) + V_d \cdot \nabla \bar{U} + \bar{V} \cdot \nabla \bar{U} - (\nabla \cdot \bar{V}/3)(\partial \bar{U} / \partial \ln p) + S = -\partial \bar{U} / \partial t, \quad (5)$$

где черта над символом означает усреднение по долготе, а S – источник, образующийся при получении этого уравнения усреднением по долготе соответствующего однородного 3D транспортно-го уравнения [16]. В работе [16] было показано, что член источника S имеет структуру суммы свертков:

$$S = \sum_i \bar{\delta q_i} \bar{\delta u_i}, \quad (6)$$

где δq_i – долготные вариации i -го члена модулирующего оператора в 3D-уравнении (например, скоростей СВ и магнитного дрейфа частиц ГКЛ во втором и третьем членах уравнения (4)), а δu_i – долготные вариации i -го члена соответствующего оператора от функции распределения ГКЛ (градиента в первых трех членах 3D-уравнения (4)).

Ясно, что все усредненные по долготе коэффициенты уравнения (6) сильно зависят от использованной 3D модели скорости СВ. Более того, как видно из рис. 1б, широтная область секторной структуры ГМП, занятая ГГТС, отличается наличием гелиодолготного градиента скорости, постепенно уменьшающего к внешней границе области. Разноскоростные потоки образуются в окрестностях ГГТС вблизи Солнца, с увеличением расстояния высокоскоростные потоки догоняют низкоскоростные, и они взаимодействуют с образованием т.н. коротящихся областей взаимодействия (CIR) (например, [9] и ссылки в ней).

Если пренебречь указанным взаимодействием разноскоростных потоков СВ, то краевая задача, основанная на 2D-уравнении (5), может быть решена [6], причем в источник (6) даст вклад только дрейфовый член уравнения (4). Естественно, ис-

пользуя 3D-модель скорости СВ (3), можно легко определить усредненную по долготе скорость СВ, показанную на рис. 2а и не сильно отличающуюся от использованной в [5]. Более того, предположив, что широтная зависимость усредненного по долготе результата взаимодействия разнородных потоков СВ (характеристик спектра неоднородностей ГМП и т.п.) $\eta(\lambda)$ определяется, например, величиной среднего по долготе модуля долготного градиента скорости СВ, можно определить $\eta_n(\lambda)$, нормированную на экваторе на единицу и показанную на рис. 2б. Тогда для некоторого параметра P этого спектра его зависимость от гелиошироты можно определить как

$$P(\lambda) = P^{pol} + (P^{eq} - P^{pol})\eta_n(\lambda), \quad (7)$$

где P^{eq} и P^{pol} – значения P на экваторе и полюсе соответственно. В качестве параметров P можно рассматривать, например, мощность спектра неоднородностей ГМП на заданной частоте P_0 и показатель частотного спектра мощностей γ . Конечно выбор зависимости результата взаимодействия разнородных потоков СВ от деталей поля скорости, фазы солнечного цикла и т.д. требует дальнейшего исследования.

Таким образом, отказавшись от рассмотрения разнородных потоков СВ и их взаимодействия (например, считая скорость СВ независимой от долготы, [6–8]), вполне можно численно исследовать модуляцию ГКЛ, пользуясь 2D-моделями. Однако согласно расчетам (например, [17]), взаимодействие разнородных потоков СВ существенно искажает с увеличением расстояния от основания гелиосферы исходную форму ГТС, ГМП и поле скорости СВ, а оценить эти искажения можно лишь путем 3D-моделирования СВ и ГМП (например, используя магнито-гидродинамический подход [17]). Поэтому мы склоняемся к предположению, что в основном для периодов средней пятнообразовательной активности Солнца, когда степень изогнутости ГТС не очень мала и слабо изменяется, решение 3D-уравнения (4) с коэффициентами, определенными заранее путем 3D-моделирования СВ и ГМП, является подходом к расчету долговременных вариаций характеристик ГКЛ, более адекватным, чем решение 2D-уравнения (5) с коэффициентами, определенными без указанного моделирования характеристик гелиосферы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Предложена 4-х параметрическая модель скорости солнечного ветра, опирающаяся на мо-

дель наклонного гелиосферного слоя. После оценки по данным наблюдений параметров модели и их возможной зависимости от фазы солнечного цикла модель может быть полезна для изучения вариаций интенсивности ГКЛ.

2. Для периодов средней пятнообразовательной активности Солнца решение трехмерных уравнений для характеристик гелиосферы и распространения ГКЛ является более адекватным подходом к расчету долговременных вариаций характеристик ГКЛ, чем решение двумерных уравнений.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (гранты №№ 17-02-00584_a, 18-02-00582_a).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kraïnev M.B., Kalinin M.S.* // ArXiv: 1411.7532. 2013.
2. *Kraïnev M., Bazilevskaya G., Kalinin M. et al.* // Proc. Sci. 2015. PoS(ICRC2015)081/1-8
3. *Schulz M.* // Ap. Space Sci. 1973. V. 24. P. 371.
4. *Balogh A., Jokipii J.R.* // Space Sci. Rev. 2009. V. 143. P. 85.
5. *Potgieter M.S.* // Living Rev. Solar Phys. 2013. V. 10. P. 3.
6. *Калинин М.С., Базилевская Г.А., Крайнев М.Б. и др.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2015. Т. 79. № 5. С. 660; *Kalinin M.S., Bazilevskaya G.A., Kraïnev M.B. et al.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2015. V. 79. № 5. P. 606.
7. *Калинин М.С., Базилевская Г.А., Крайнев М.Б. и др.* // Геомагн. и аэрон. 2017. Т. 57. № 5. С. 1; *Kalinin M.S., Bazilevskaya G.A., Kraïnev M.B. et al.* // Geomagn. Aeron. 2017. V. 57. № 5. P. 549.
8. *Крайнев М.Б., Базилевская Г.А., Калинин М.С. и др.* // Геомагн. и аэрон. 2018. Т. 58. № 2. С. 177; *Kraïnev M.B., Bazilevskaya G.A., Kalinin M.S. et al.* // Geomagn. Aeron. 2018. V. 58. № 2. P. 169.
9. *Richardson I.G.* // Living Rev. Solar Phys. 2018. V. 15. P. 1.
10. *Свиржевский Н.С., Базилевская Г.А., Калинин М.С. и др.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2015. Т. 79. № 5. С. 663; *Svirzhevsky N.S., Bazilevskaya G.A., Kalinin M.S. et al.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2015. V. 79. № 5. P. 609.
11. <http://wso.stanford.edu/>.
12. *Kraïnev M.B., Kalinin M.S.* // Proc. 12th Intern. Solar Wind Conf. Saint-Mal. 2009. AIP Conf. Proc. 2010. V. 1216. P. 371.
13. *Крымский Г.Ф.* // Геомаг. аэрон. 1964. Т. 4. № 6. С. 977; *Krymskiy G.F.* // Geomagn. Aeron. 1964. V. 4. № 6. P. 763.
14. *Parker E.N.* // Planet. Space Sci. 1965. V. 13. P. 9.
15. *Jokipii J.R., Levy E.H., Hubbard W.B.* // Astrophys. J. 1977. V. 213. P. 861.
16. *Kalinin M.S., Kraïnev M.B.* // Proc. 24th ICRC. (Rome, 1995). V. 4. P. 688.
17. *Guo X., Florinski V.* // Astrophys. J. 2016. V. 826. P. 65.