

О ХАРАКТЕРИСТИКАХ ГЕЛИОСФЕРЫ, ВАЖНЫХ ДЛЯ ГАЛАКТИЧЕСКИХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ, В ФАЗЕ МИНИМУМА СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

М. Б. Крайнев

Обсуждаются различные характеристики гелиосферы, важные для поведения в ней космических лучей – скорость солнечного ветра, гелиосферное магнитное поле и гелиосферный токовый слой – в эпохи минимума солнечных циклов 20–24. Выделяются основные черты и закономерности поведения этих характеристик и связи их между собой.

Ключевые слова: Солнце, гелиосфера, скорость солнечного ветра, гелиосферное магнитное поле, минимум цикла солнечной активности, галактические космические лучи.

При теоретическом исследовании вариаций интенсивности $J(\vec{r}, T, t)$ галактических космических лучей (ГКЛ) в гелиосфере решают краевую задачу для функции распределения ГКЛ $U(\vec{r}, p, t) = J(\vec{r}, T, t)/p^2$, включающую хорошо известное транспортное уравнение [5, 6, 1]:

$$\frac{\partial U}{\partial t} - \nabla(K\nabla U) + (\vec{V}^{sw} + \vec{V}^d) \nabla U - \frac{\nabla \vec{V}^{sw}}{3} p \frac{\partial U}{\partial p} = 0, \quad (1)$$

где $T, p, K, \vec{V}^d, \vec{V}^{sw}$ – соответственно, кинетическая энергия и импульс частиц, их тензор диффузии, скорость дрейфа в неоднородном гелиосферном магнитном поле (ГМП) и скорость солнечного ветра (СВ). В свою очередь скорость дрейфа выражается через монопольное (т. е. с радиальной компонентой, всюду направленной от Солнца) регулярное гелиосферное магнитное поле \vec{B}^m и $F = +1, -1$ – полярность ГМП, определяемую формой гелиосферного токового слоя (ГТС), при пересечении которого полярность меняется на противоположную: $\vec{V}^d = pv/3q [\nabla \times (F\vec{B}^m/B^2)]$ [3], а тензор диффузии K сильно зависит от модуля ГМП B . Таким образом, даже для решения краевой задачи с уравнением (1) в простейшем 2D случае (усреднение всех характеристик по долготе) необходимо задать удовлетворяющие наблюдениям

зависимости $\vec{V}^{sw}(r, \vartheta)$, $\vec{B}^m(r, \vartheta)$, $F(\vartheta)$. Поскольку нас особенно интересуют периоды низкой солнечной активности, когда интенсивность ГКЛ достигает наивысших значений в солнечном цикле, необходимо в первую очередь сформулировать основные закономерности в поведении гелиосферных характеристик в эти периоды.

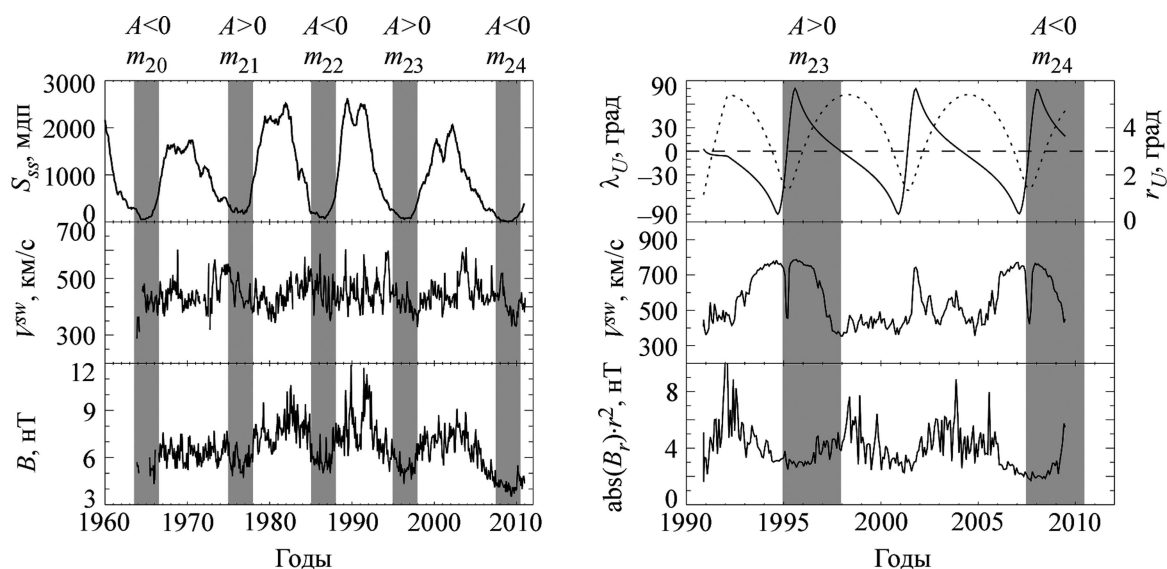


Рис. 1: Усреднённые за оборот Солнца характеристики гелиосферы [9, 11]. Затемнёнными полосами показаны интервалы низкой солнечной активности (и высокой интенсивности ГКЛ). Левые панели: уровень солнечной активности (суммарная площадь солнечных пятен [8], сглаженная с периодом 1 год — верхняя панель); характеристики гелиосферы на орбите Земли: скорость солнечного ветра (средняя панель) и индукция ГМП (нижняя панель). Правые панели: координаты космического аппарата Ulysses: гелиоширота (сплошная линия) и гелиоцентрическое расстояние (штриховая линия) — верхняя панель; характеристики гелиосферы на орбите Ulysses: скорость солнечного ветра (средняя панель) и радиальная компонента индукции ГМП, приведённая к $r = 1$ а. е. (нижняя панель).

Скорость СВ и индукция ГМП. На средней и нижней левых панелях рис. 1 показано поведение в 1960–2011 гг. усреднённых за оборот Солнца скорости СВ и индукции ГМП на орбите Земли. Видно, что в поведении B наблюдается хорошо выраженный солнечный цикл в фазе с циклом пятнообразования, а в скорости солнечного ветра этот цикл практически отсутствует. Кроме того, заметно, что в последний минимум СА (2008–2010 гг.) как V^{sw} , так и особенно B достигают наименьших значений за всё

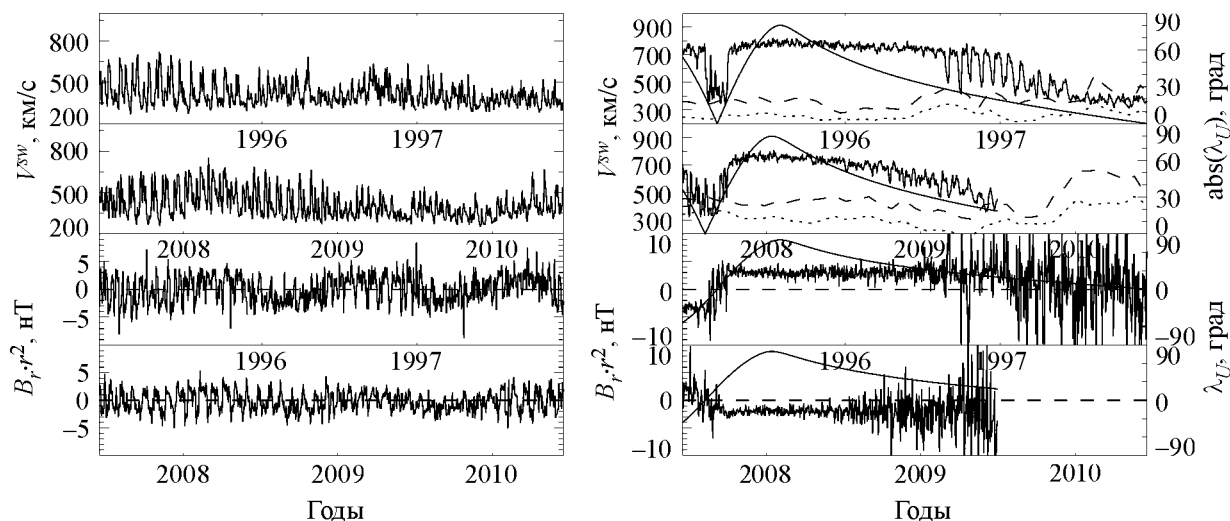


Рис. 2: Среднесуточные значения характеристик гелиосферы [9, 11] в двух последних минимумах солнечной активности. Левые панели: скорость солнечного ветра (две верхние панели) и радиальная компонента ГМП (две нижние панели) на орбите Земли. Правые панели: скорость солнечного ветра (две верхние панели) и радиальная компонента ГМП (две нижние панели) на орбите *Ulysses*. На правых верхних панелях также показаны модули гелиошироты *Ulysses* (сплошная кривая) и широтной границы ГТС по двум моделям WSO: *Radial* (пунктир) и *Classic* (штриховая линия), а на нижних — гелиоширота *Ulysses* (плавная сплошная линия).

время измерений. На левых панелях рис. 2 показаны среднесуточные значения этих характеристик в периоды низкой активности двух последних циклов. Видно, что скорость СВ сильно меняется за оборот Солнца, причём её максимальные значения достигаются вдали от ГТС, а минимальные, соответствующие пересечению Землёй ГТС, изменяются слабо ($V_{\min}^{sw} \approx 300$ км/с). Радиальная компонента B_r меняет знак при пересечении ГТС и её преимущественная полярность хорошо коррелирует (или антикоррелирует) с гелиоширотой Земли, что говорит о том, что Земля постоянно находится в широтных границах гофрированного ГТС. Однако абсолютная величина B_r внутри каждого сектора изменяется слабо. Основные закономерности в поведении среднесуточных скорости СВ и индукции ГМП в предыдущие три минимума аналогичны.

На правых панелях рис. 1 показаны траектория КА *Ulysses* и поведение усреднённых за оборот Солнца скорости СВ и радиальной компоненты ГМП, приведённой к расстоянию $r = 1$ а. е., вдоль этой траектории. Видно, что на низких гелиоширотах, а также в периоды высокой активности Солнца скорость СВ невысока (400–500 км/с). При вы-

ходе же *Ulysses* на высокие широты в периоды низкой активности скорость возрастает до 700–800 км/с. Модуль приведённой к $r = 1$ а. е. радиальной компоненты индукции ГМП в периоды минимума слабо меняется, а с повышением активности существенно возрастает на всех широтах. На правых панелях рис. 2 показаны среднесуточные значения V^{sw} и B_r во время двух витков Уллиса (первого и третьего) в периоды низкой солнечной активности. Видно, что на средних и низких гелиоширотах V^{sw} , как и около Земли, сильно зависит от расстояния до ГТС, а на высоких — практически не изменяется с широтой. Очевидно, границей между этими двумя областями является ГТС. Независимость V^{sw} от широты относится к периоду минимума СЦ 23, а в минимуме СЦ 24 заметно общее уменьшение V^{sw} на всех широтах. Что касается B_r , приведённой к $r = 1$ а. е., на широтах выше ГТС она практически не меняется, а в зоне ГТС варьирует довольно сильно. Отметим, что качество данных *Ulysses* сильно ухудшилось с начала 2008 г., а в середине 2009 г. *Ulysses* перестал функционировать. Важность вклада данных *Ulysses* в развитие наших представлений о характеристиках солнечного ветра и ГМП и роль магнитного потока Солнца в формировании этих характеристик обсуждаются в [7]. Один из важных выводов — что в основном регулярное ГМП соответствует модели Паркера [6]:

$$\vec{B}^m = |B_{r,E}| \left(\frac{r_E}{r} \right)^2 \left(\vec{e}_r - \frac{r\omega}{V^{sw}} \vec{e}_\varphi \right), \quad (2)$$

где $B_{r,E}$, ω , \vec{e}_r и \vec{e}_φ — радиальная компонента ГМП на расстоянии r_E , угловая скорость вращения Солнца и единичные векторы в радиальном и азимутальном направлениях, соответственно. Таким образом, поведение как V^{sw} , так и B (согласно (2)) сильно зависит от формы ГТС, так что эта характеристика гелиосферы является важной для конвекции ГКЛ и их диффузии (которая сильно зависит от B).

ГТС и скорость дрейфа заряженных частиц. Основным источником наших представлений о форме ГТС в настоящее время является модель Wilcox Solar Observatory (WSO, USA), основанная на ежедневном сканировании компоненты вдоль луча зрения B_{ls} крупномасштабного фотосферного магнитного поля (на $r = r_S$) и позволяющая оценить индукцию магнитного поля на т. н. “поверхности источника” ГМП ($r_{SS} = (1.5 - 3.25)r_S$; [2]). Для этого в слое $r_S < r < r_{SS}$ рассчитывается \vec{B} в потенциальном приближении с использованием наружного граничного значения $B_{\vartheta,\varphi} = 0$ и двух вариантов внутренних граничных условий: 1) Classic — в качестве граничного условия берётся всё наблюдаемое B_{ls} и 2) Radial — предполагается, что поле на фотосфере радиально, а B_{ls} — её проекция на луч зрения. Для обоих вариантов на

сайте [10] регулярно публикуются коэффициенты разложения компонент магнитного поля по сферическим функциям для каждого оборота Солнца. Тогда, рассчитав $B_r(\vartheta, \varphi)$ на поверхности источника и найдя изолинию $B_r(\vartheta, \varphi) = 0$, легко определить для каждого оборота форму нейтральной линии на поверхности источника (НЛПИ), которая, как считается, неплохо соответствует форме ГТС.

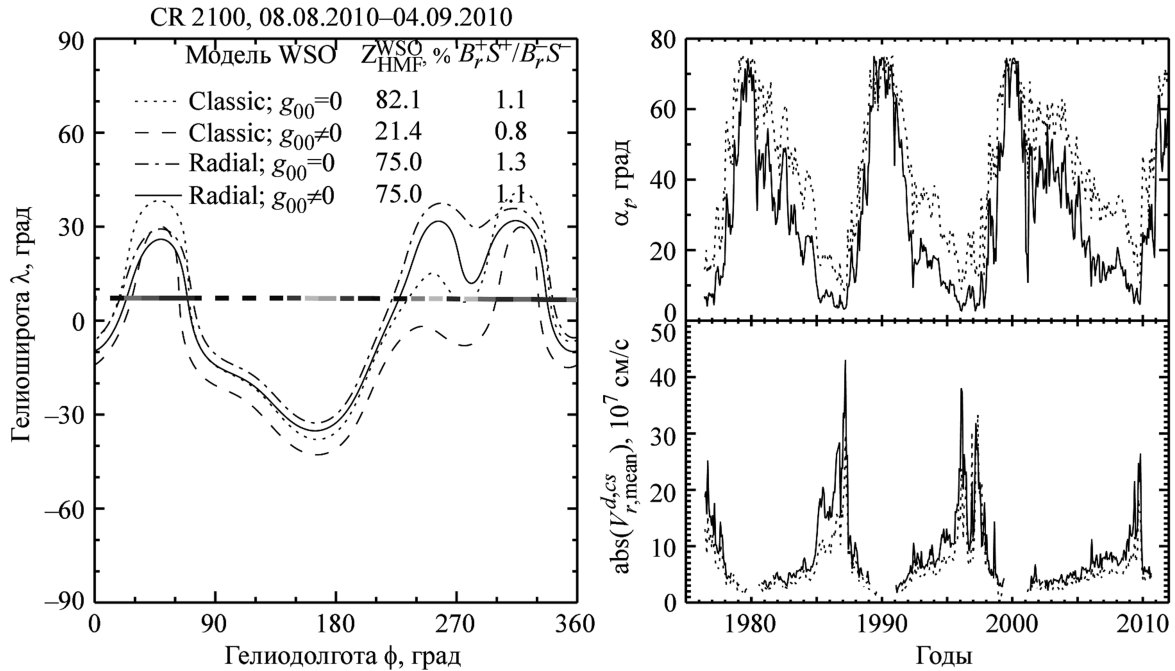


Рис. 3: Форма ГТС и средняя скорость магнитного дрейфа вдоль него. Левая панель: пример сравнения характеристик магнитного поля на орбите Земли и на поверхности источника ГМП для разных вариантов модели WSO. Форма ГТС показана линиями разного типа для четырёх вариантов модели WSO [2, 10]. Траектория Земли показана близкой к прямой линией, а полярность ГМП — утолщёнными отрезками разной интенсивности вдоль неё (более интенсивным цветом с положительной, менее интенсивным — с отрицательной полярностью ГМП, а дни без выраженной полярности не закрашены). Процент дней с совпадением полярности ГМП и поля на поверхности источника и отношение магнитных потоков в магнитных полушариях гелиосферы показаны в двух правых столбцах для различных вариантов модели WSO. Правые панели: половина широтного диапазона ГТС (верхняя панель) и модуль средней дрейфовой скорости вдоль ГТС ([3]; нижняя панель) для вариантов Radial (сплошные линии) и Classic (пунктир) моделей WSO с учётом монополярных членов.

Мы рассчитали форму НЛПИ для четырёх случаев: для обоих вариантов модели WSO с учётом ($g_{00} \neq 0$) и без учёта ($g_{00} = 0$) монопольного члена (обсуждение смысла и поведения этого члена см. [4]). На левой панели рис. 3 показан пример форм ГТС на поверхности источника для всех четырёх вариантов модели WSO, а также траектория Земли и полярность ГМП около неё, перенесённая к Солнцу со скоростью, соответствующей пересечению Землёй ГТС. Для каждого варианта показаны также степень согласия ($\zeta_{\text{HMF}}^{\text{WSO}}$) полярности ГМП около Земли с полярностью на поверхности источника и коэффициент соответствия магнитных потоков в разных магнитных полушариях, $B_r^+ S^+ / B_r^- S^-$, где $B_r^{+/-}$ и $S^{+/-}$ — соответственно, радиальная компонента ГМП около Земли и площадь магнитного полушария на поверхности источника для + и – полушариев. Оказалось, что при усреднении за все 5 периодов низкой солнечной активности процент совпадений $\zeta_{\text{HMF}}^{\text{WSO}} = 82 \pm 3\%$ самый высокий для варианта Radial, $g_{00} \neq 0$ модели WSO и коэффициент соответствия магнитных потоков для этой модели тоже ближе к 1 ($B_r^+ S^+ / B_r^- S^- = 1.02 \pm 0.06$), чем для других. Таким образом, поведение полярности и радиальной компоненты напряжённости ГМП около Земли лучше всего согласуется с вариантом Radial модели WSO. С другой стороны, из поведения среднесуточных V^{sw} и $B_r \cdot r^2$ вдоль траектории Улисса, показанного на правых панелях рис. 2, видно, что моменты первого и последнего пересечения Уллисом ГТС на краях областей однородных V^{sw} и $B_r \cdot r^2$ намного лучше соответствуют форме ГТС, рассчитанной по варианту Classic модели WSO, чем варианту Radial. Правда, Ulysses находится в широтных границах гофрированного ГТС значительно меньшую долю времени, чем Земля.

Зная форму ГТС, можно рассчитать скорость магнитного дрейфа частиц [3], причём в ней можно выделить дрейф в регулярном ГМП и вдоль ГТС, $\vec{V}^d = \vec{V}^{d,reg} + \vec{V}^{d,cs}$, где

$$\vec{V}^{d,reg} = \frac{pv}{3q} \cdot F \cdot \left[\nabla \times \frac{\vec{B}^m}{B^2} \right], \quad (3)$$

$$\vec{V}^{d,cs} = \frac{pv}{3qB} \left[\nabla F \times \frac{\vec{B}^m}{B} \right]. \quad (4)$$

Таким образом, в двумерном случае основная характеристика формы ГТС F – усреднённая по долготе полярность ГМП – является коэффициентом ослабления (и обращения направления) регулярного дрейфа (3) частиц в широтной зоне ГТС по сравнению со случаем дрейфа без ГТС, а его градиент определяет усреднённый по долготе дрейф вдоль ГТС (4). Для простейшего случая, т. н. наклонного ГТС, его форма $\vartheta^{cs}(r, \varphi)$ определяется одним параметром (т. н. “квазитилт”, α_t , равный половине

диапазона широт, занимаемого ГТС), $\vartheta^{cs} = \pi/2 - \arctan(\tan\alpha_t \sin\varphi)$, см. ссылки в [3]. Для общего случая форма ГТС, определённая по модели WSO, существенно отличается от простой, и для расчёта скорости дрейфа и интенсивности ГКЛ следует использовать расчётные НЛПИ [3]. На правых панелях рис. 3 показаны временные профили квазитилта, а также модуля средней по широтной зоне ГТС скорости дрейфа вдоль него, определённых для вариантов Classic и Radial модели WSO с учётом монопольных членов. Ясно, что как коэффициент ослабления регулярного дрейфа частиц, так и средняя скорость дрейфа вдоль ГТС существенно отличаются для разных вариантов модели WSO. Поэтому можно надеяться, что расчёты характеристик ГКЛ с использованием этих вариантов и сравнение результатов расчётов с наблюдениями позволят осуществить независимое тестирование модели WSO.

Выводы.

1. Поведение как скорости СВ, так и модуля гелиосферного магнитного поля сильно зависит от формы ГТС, так что эта характеристика гелиосферы является очень важной не только для магнитного дрейфа частиц ГКЛ, но и для их конвекции и диффузии.

2. Поведение характеристик гелиосферного магнитного поля около Земли лучше всего согласуется с вариантом Radial модели WSO. С другой стороны, данные по скорости солнечного ветра и гелиосферному магнитному полю вдоль траектории Улисса лучше соответствуют форме ГТС, рассчитанной по варианту Classic этой модели.

3. Так как характеристики магнитного дрейфа частиц существенно отличаются для разных вариантов модели WSO, можно надеяться, что расчёты характеристик ГКЛ с использованием этих вариантов и сравнение результатов расчётов с наблюдениями позволят осуществить независимое тестирование модели WSO.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] J. R. Jokipii, E. H. Levy, and W. B. Hubbard, *The Astrophysical Journal* **213**, 861 (1977).
- [2] J. T. Hoeksema, PhD Thesis, Stanford University, USA, 222 p. (1984).
- [3] M. B. Krainev, M. S. Kalinin, *AIP Conference Proceedings* **1216**, 371 (2010).
- [4] М. Б. Крайнев, *Краткие сообщения по физике ФИАН*, **39**(4), 3 (2012).
- [5] Г. Ф. Крымский, *Геомагнетизм и аэрономия* **4**, 977 (1964).
- [6] E. N. Parker, *Planetary Space Science* **13**, 9 (1965).

- [7] E. J. Smith, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* **73**, 277 (2011); doi 10.1016/j.jastp.2010.03.019.
- [8] <http://solarscience.msfc.nasa.gov/greenwch.shtml>
- [9] ftp://nssdcftp.gsfc.nasa.gov/spacecraft_data/omni
- [10] <http://wso.stanford.edu/>
- [11] <http://helio.esa.int/ulysses/>

Поступила в редакцию 30 июня 2011 г.