

УЧЁТ ВЛИЯНИЯ ТРЁХМЕРНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ГЕЛИОСФЕРНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ, ОБУСЛОВЛЕННОГО КОРОТИРУЮЩИМИ ОБЛАСТЯМИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СКОРОСТИ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА, НА ИНТЕНСИВНОСТЬ ГКЛ В 2D ЗАДАЧАХ МОДУЛЯЦИИ.

Калинин М.С., Крайнев М.Б.

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

e-mail: kalininms@lebedev.ru; mrainev46@mail.ru

ВВЕДЕНИЕ

Вследствие долготной неоднородности скорости солнечного ветра (СВ) в гелиосфере начиная с радиальных расстояний 0.1-0.2 АЕ образуется область взаимодействия разноскоростных потоков плазмы СВ, которая может простираться до расстояний в десятки АЕ. Эти области характеризуются перераспределением вещества плазмы и гелиосферного магнитного поля (ГМП) и, вращаясь вместе с Солнцем, получили название коротирующих областей взаимодействия (КОВ). На орбите Земли КОВ проявляются в виде рекуррентных вариаций скорости СВ и ГМП, а также интенсивности галактических космических лучей (ГКЛ) с периодами, близкими к периоду вращения Солнца ($T_{\odot} \approx 27$ дней). Образование КОВ часто связывается с возрастанием скорости СВ по мере удаления от гелиосферного токового слоя (ГТС), но могут наблюдаться и далеко за пределами секторной зоны [1; 2; 3]. Ввиду глобальности КОВ и затруднённости прямых измерений на разных гелиоцентрических расстояниях, их регистрация относится, в основном, к орбите Земли. Изучение их образования, развитие и воздействие на интенсивность ГКЛ проводилось в последние 10-15 лет на основе магнитно-гидродинамических (МГД) модельных подходов (численных), сильно зависящих от физических условий вблизи Солнца (до расстояний 0.1 - 0.2 АЕ), которые являются для МГД-системы граничными условиями.

Практически, для произвольного оборота Солнца, когда в вариациях интенсивности ГКЛ проявляются КОВ, а Солнце в поведении наблюдаемых характеристик квазистационарно, на основе стационарных внутренних граничных условий решается нестационарная задача до времени установления квазистационарного решения во всей области решения.

Для задач долгопериодических вариаций ГКЛ из полного решения системы МГД- уравнений используются только трёхмерные распределения поля скоростей СВ и ГМП. Поскольку МГД система решается с весьма малым по пространственным переменным шагом, использование такой сетки при решении уравнения модуляции проблематично, поскольку требует много расчётного времени (при решении методом конечных разностей), поэтому обычно задачи модуляции ГКЛ решаются при многократном увеличении пространственных шагов.

Численному исследованию гелиосферы и ГКЛ за конкретные обороты Солнца посвящено много работ [см., например, 4; 5; 6; 7; 8]. Большинство работ ориентировано на исследование долготных вариаций интенсивности ГКЛ – так называемых 27-дневных вариаций, регистрируемых на орбите Земли с 70-х годов прошлого века. Расчёты в этих работах в основном производятся до радиальных расстояний 1 АЕ. В работе [7] представлена методика решения и анализ результатов до ≈ 30 АЕ для конкретного керрингтоновского оборота 2066, когда наблюдались КОВ и сопутствующие им 27-дневные вариации интенсивности ГКЛ. Эта работа предоставляет возможность более масштабного анализа распределения ГМП и поля скорости СВ с выделением в этих распределениях глобальных структур, важных при рассмотрении модуляции ГКЛ.

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ СВ и ГМП ДЛЯ КЕРРИНГТОНОВСКОГО ОБОРОТА 2066

Анализ долготно-широтного распределения радиальных компонент скорости СВ и ГМП на исходной поверхности ($r = 0.19$ АЕ, а,б) и внешней границе (r

=28.44 АЕ, в,г), как решения полной системы МГД-уравнений показывает, что их распределение между граничными поверхностями области решения достаточно неоднородно и, из-за наличия гелиосферного токового слоя (ГТС), имеет сложную пространственную геометрию.

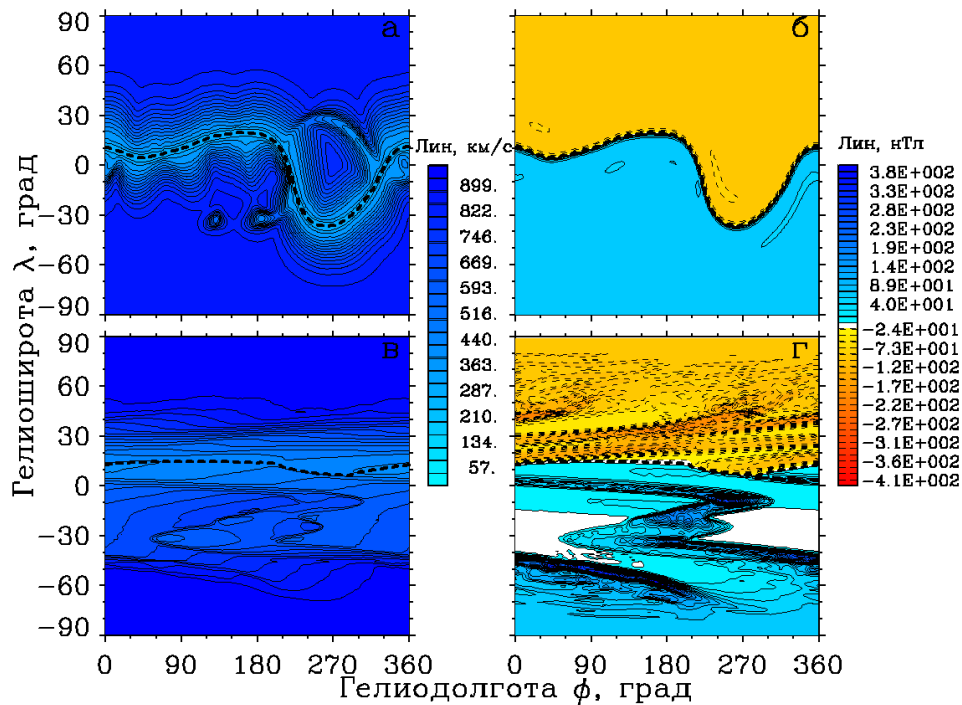


Рис.1. из работы [9]. Распределение по долготе и широте радиальных компонент скорости СВ (панели а, в) и регулярного ГМП (панели б, г) на исходном ($r = 0.19$ а.е; панели а, б) и конечном ($r = 28.44$ а.е; панели в, г) уровнях МГД-расчётов [8]. Распределение ГМП на конечном уровне нормировано к распределению на исходном уровне умножением V_r на $(r_{out}^{MHD}/r_{in})^2$. Чёрными штриховыми линиями показано положение ГТС.

При заданных граничных условиях на внутренней границе, имеющих небольшую долготную асимметрию на внутренней границе области решения, на внешней границе распределения скорости СВ и ГМП отличаются сильной неоднородностью (среднее по широте значение ГМП при $r=28.44$ равно 0.003 ± 0.002 нТ). С точки зрения выделения глобальных областей характерного поведения ГМП в гелиосфере картина выглядит следующим образом: до радиальных расстояний $r \approx 1$ АЕ его величина возрастает в среднем в 1.2 раза по сравнению с его значением, если бы оно от внутренней границы изменялось согласно паркеровскому закону, когда взаимодействия

между разноскоростными потоками нет. Начиная с расстояний 1 АЕ и до 5-6 АЕ поле сильно ослабевает (до 70%), при $r \geq 6$ АЕ величина ГМП слабо меняется с радиальным расстоянием, но становится сильно неоднородным. Таким образом, на внешней границе области МГД-решения оно сильно подавлено по сравнению с паркеровским его описанием, которое обычно применяется для описания данных измерений на основе уравнения модуляции.

Описанная выше стационарная картина распределения ГМП в гелиосфере, как результат взаимодействия разноскоростных потоков плазмы СВ, должна найти отражение при описании долгопериодических вариаций ГКЛ, поскольку ГМП является основным модулирующим фактором. В работе [8] для 2066 керрингтоновского оборота методом Монте-Карло рассчитан спектр протонов в рамках дрейфово-доминирующей модели (диффузия сильно ослаблена) с учётом установившихся распределений ГМП и поля скоростей СВ. Этот спектр удивительно хорошо согласуется с спектром, рассчитанным ранее в работе [9] разностным методом по диффузионно-доминирующей модели, но, в рамках двухкомпонентного паркеровского ГМП. Согласие этих двух идейно различных моделей модуляции также может указывать на сильное влияние установившихся глобальных областей распределения ГМП, как результата взаимодействия разноскоростных потоков плазмы СВ, на долгопериодическую модуляцию ГКЛ. Общая стратегия изучения такого влияния представлена в работе [10]. В работе [11] сделан первый шаг в этом направлении, когда распределение скорости СВ и ГМП везде в гелиосфере определялось на основе общепринятой двухкомпонентной паркеровской модели, исходя из граничных условий вблизи Солнца для полной МГД-задачи за 2066 оборот.

В данной работе мы на основе паркеровского описания ГМП учитываем влияние деформации гелиосферного токового слоя, как функции

радиального расстояния, на спектр протонов. Немодулированный спектр и коэффициенты были приняты как в работе [8].

ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЁТА

В работе использовалась двухмерная (2D) по пространственным координатам модель гелиосферы и для расчёта спектров решалось уравнение модуляции Паркера [12] для функции распределения U

$$\nabla \cdot (\mathbf{K} \cdot \nabla U) - (\mathbf{V} + \mathbf{V}_d) \cdot \nabla U + \frac{\nabla \cdot \mathbf{V}}{3} \frac{\partial U}{\partial \ln p} = 0, \quad (1)$$

с соответствующими граничными условиями: на внутренней границе для скорости СВ V_r и радиальной компоненты B_r были взяты усреднённые по долготе их распределения из граничных условий для МГД-задачи за 2066 оборот, на внешней границе ($r_b = 122$ АЕ) – обычные для уравнения модуляции условия.

Везде в области решения скорость СВ определялась по её значению на внутренней границе, а компоненты ГМП по паркеровской модели:

$$B_r = B_r^{in} \cdot \frac{r_{in}^2}{r^2}, \quad B_\varphi = -B_r \cdot \frac{\omega(r-r_s) \sin \theta}{V_r} \quad (2)$$

Коэффициенты тензора диффузии \mathbf{K} и немодулированный спектр J_{LIS} были взяты из работы [8]:

$$K_{\parallel} = K_{\parallel 0} \beta \left(\frac{R}{R_0} \right)^{0.5} \frac{B_{eq}}{B}, \quad K_{\perp} = K_{\perp 0} \beta \left(\frac{R}{R_0} \right)^{0.5} \frac{B_{eq}}{B}, \quad (3)$$

$$J_{LIS} = 2700 \frac{E^{1.12}}{\beta^2} \left(\frac{E + 0.67}{1.67} \right)^{-3.93}, \quad (4)$$

где $K_{\parallel 0} = 19 \cdot 10^{20} \text{ см}^2 / \text{с}$, $K_{\perp 0} = 0.094 \cdot K_{\parallel 0}$; β и R – отношение скоростей частицы и света и жёсткость частиц, $R_0 = 1$ ГэВ, а B_{eq} – напряжённость ГМП на орбите Земли. Средняя скорость дрейфа \mathbf{V}_d определяется суммой скорости регулярного дрейфа и дрейфа вдоль ГТС:

$$\mathbf{V}_d = \mathbf{V}_d^{reg} + \mathbf{V}_d^{cs}, \quad \mathbf{V}_d^{reg} = \frac{pv}{3q} \cdot F \cdot \left[\nabla \times \frac{\mathbf{B}_m}{B^2} \right], \quad \mathbf{V}_d^{cs} = \frac{pv}{3q} \cdot \left[\nabla F \times \frac{\mathbf{B}_m}{B^2} \right], \quad (5)$$

где \mathbf{V}_m – монополярная скорость дрейфа, определяемая как абсолютная величина ГМП, не зависящая от знака ГМП, а F – зависящая от знака ГМП и определяемая, например, как $\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{B_r}{|B_r|} d\varphi$ функция. Широтная зависимость этой функции и её производной по широте на трёх радиальных расстояниях показана на Рис.2.

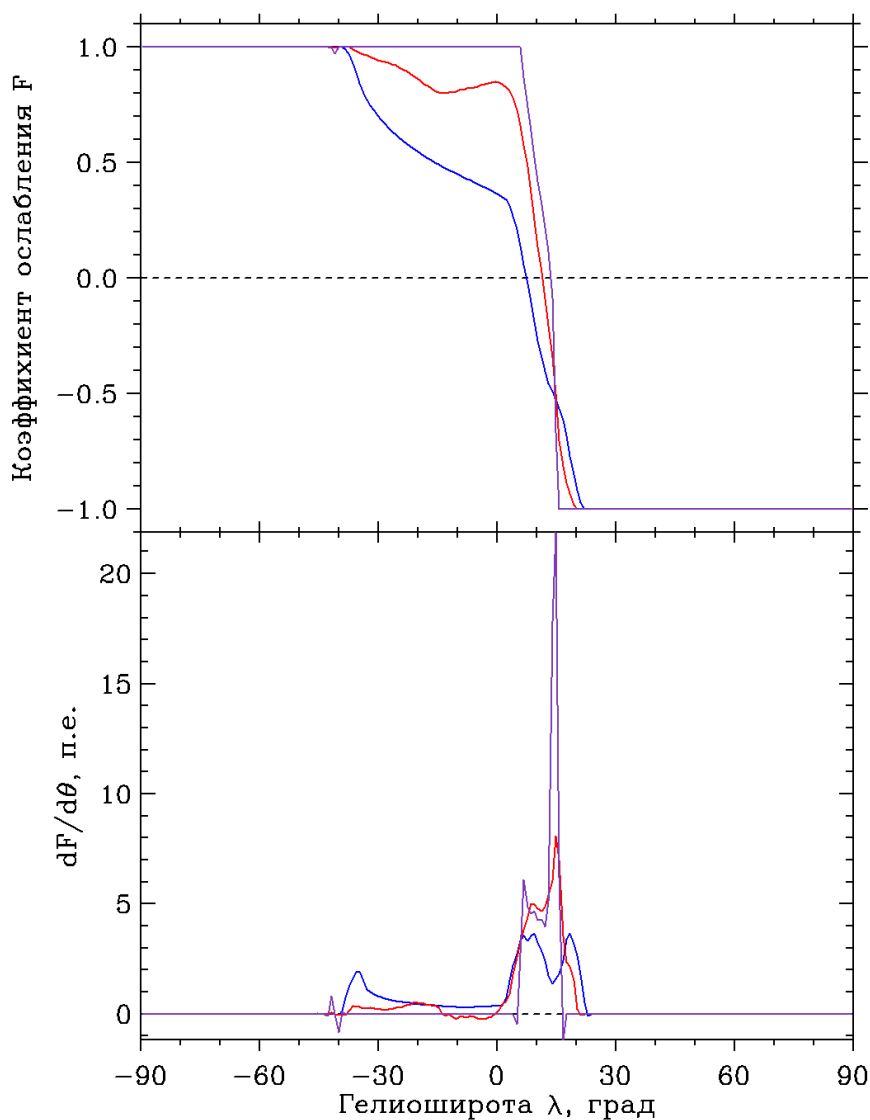


Рис.2. Широтная зависимость функции F – верхний рисунок, производная F по полярному углу – нижний рисунок на разных радиальных расстояниях. Синие линии – на внутренней границе области решения МГД-системы, красная линия – среднее по радиальному интервалу области решения МГД-системы значение F и её производной, тёмная кривая – на внешней границе области решения.

Функция F , в принятой модели с доминированием дрейфового механизма модуляции над диффузионным, имеет решающее значение, поскольку позволяет отслеживать степень изменения ГТС (или ширину секторной зоны) с радиальным расстоянием. Однако в этой работе мы не рассчитывали её на каждом шаге по радиальному расстоянию, а ограничились значениями на трёх радиальных расстояниях: на внутренней границе области решения ($r=0.19$ АЕ), её радиальным средним по области решения полной МГД-задачи и на внешней границе области МГД-решения.

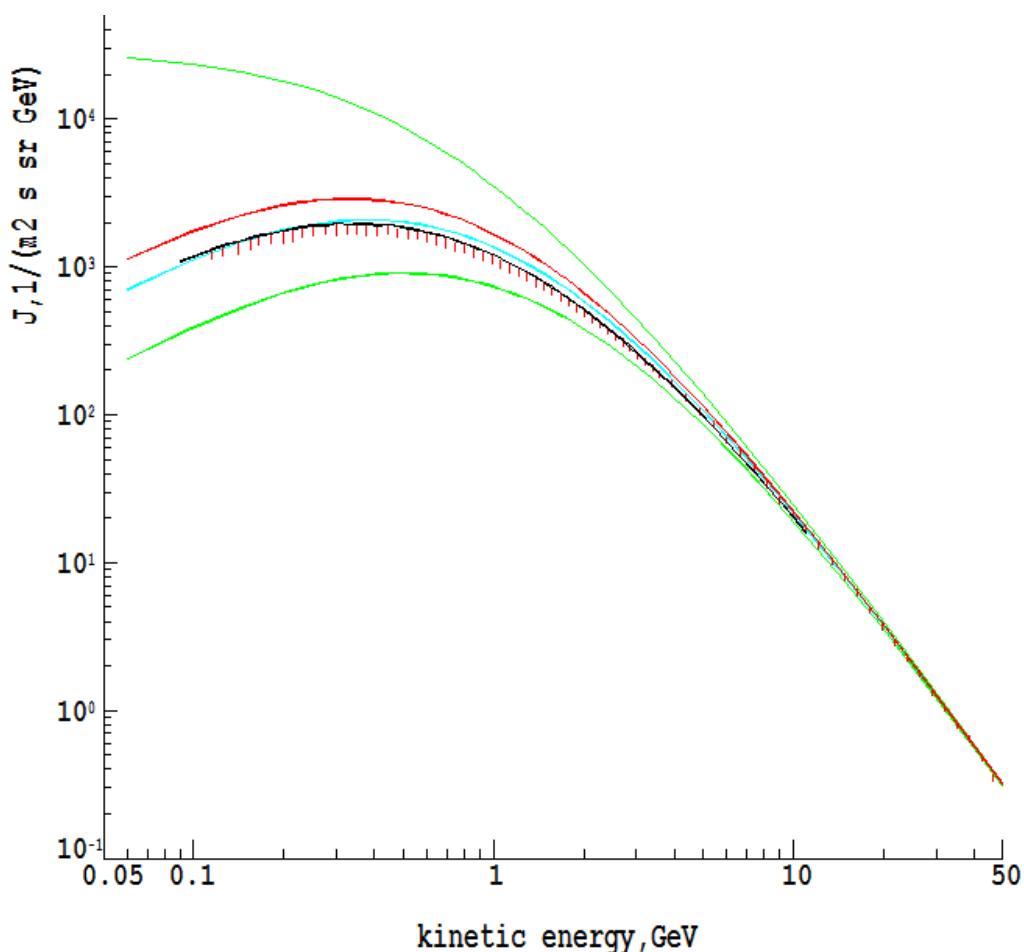


Рис.3. Спектры протонов около Земли для трёх функций F , рассчитанных на различных радиальных расстояниях по распределению магнитного поля как решению МГД-системы уравнений. Нижний спектр (зелёный цвет) соответствует распределению F на внутренней границе области решения ($r=0.19$ АЕ), голубая кривая – радиальному среднему F по области МГД-решения, красная – по значению F на внешней границе области решения ($r=28.44$ АЕ). Верхняя зелёная кривая – немодулированный спектр J_{LIS} .

Чёрным цветом показан спектр протонов, рассчитанный методом Монте-Карло в работе []. Вертикальные светлые штрихи – данные спектрометра *Памела* за 2066 керрингтоновский оборот.

Обоснованием для такого подхода является хорошо известный (и понятный) факт: при решении стационарного уравнения модуляции при меняющемся значении (на поверхности источника) угла наклона эффективно «работает» её значение на некотором радиальном расстоянии.

Расчёты спектров протонов проводились для трёх зависимостей F , показанных на Рис.2. Соответствующие три спектра представлены на Рис.3.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе на основе общепринятого в теории модуляции паркеровского описания ГМП рассчитаны спектры протонов за 2066 солнечный оборот. Вследствие того, что уравнение Паркера решалось в рамках дрейфово-доминирующей модели, для которой важна зависимость параметра F от радиального расстояния, были рассмотрены три варианта. Нижняя кривая демонстрирует, что если в классической задаче модуляции использовать только граничные условия для скорости СВ и ГМП, которые ставились при решении полной МГД задачи, то результат явно не описывает данные измерений. Кривая голубого цвета указывает, что при использовании радиального среднего по области решения МГД-задачи значения F , то описание достаточно близко к измеренному спектру. Наконец, красная кривая показывает, что использование значения F , рассчитанного на внешней границе МГД-решения (когда ГТС сильно сужился за пределами $r=28$ АЕ), что модуляция значительно ослаблена, и не описывает данные *памелы*. В целом расчёты указывают, что наличие области (от $r=28.44$ АЕ до $r=122$ АЕ) с значительным ослаблением ГМП по сравнению с паркеровским (при заданных внутренних граничных значениях) значительно ослабляют модуляцию ГКЛ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Schulz M. Interplanetary sector structure and the heliomagnetic equator, *Astrophys. Space Sci.*, 1973, Vol. 24, pp. 371-384, DOI: 10.1007/BF02637162
2. Hundhausen A.J. *Coronal Expansion and Solar Wind*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 1972, p. 238.
3. Wang Y.-M., Sheeley N.R., Jr. Solar wind speed and coronal flux-tube expansion, *ApJ*, 1990, Vol. 355, p. 726, DOI: 10.1086/168805
4. Wiengarten, T., Kleimann J., Fichtner H., P. Kühl P., Kopp A., Heber B., and Kissmann R. Cosmic ray transport in heliospheric magnetic structures. I. Modeling background solar wind using the CRONOS magnetohydrodynamic code, *ApJ*, 2014, Vol. 788, i. 80, DOI 10.1088/0004-637X/788/1/80
5. Kopp A., Wiengarten T., Fichtner H., Effenberger F. , Kühl P., Heber B., Jan-Louis Raath J.-L., Potgieter M. Cosmic-Ray Transport in Heliospheric Magnetic Structures. II. Modeling Particle Transport through Corotating Interaction Regions, *ApJ*, 2017, 837:37, 9 p., <https://doi.org/10.3847/1538-4357/aa603b>.
6. Guo X., and Florinski V. Galactic cosmic-ray intensity modulation by corotating interaction region stream interfaces at 1 AU, *ApJ*, 2016, Vol. 826, i. 65, 13 p., doi:10.3847/0004-637X/826/1/65
7. Shen F., Yang Z., Zhang J., Wei W., and Feng X. Three-dimensional MHD simulation of solar wind using a new boundary treatment: comparison with in situ data at Earth, *ApJ*, 2018, 866:1, p.18, DOI 10.3847/1538-4357/aad806
8. Luo, X., Zhang, M., Feng, X., et al. A numerical study of the effects of corotating interaction regions on cosmic-ray transport, *ApJ*, 899, 90, 2020
9. M.S. Potgieter·E.E. Vos·M. Boezio·N. at al. Modulation of Galactic Protons in the Heliosphere during the Unusual Solar Minimum of 2006 to 2009 // *Solar Phys.* 289:391–406. 2014. DOI 10.1007/s11207-013-0324-6
10. М.Б. Крайнев , М.С. Калинин, Г.А. Базилевская, А.К. Свиржевская, Н.С. Свиржевский, С. Луо, О.П.М. Аслам, Ф. Шен, М.Д. Нгобени, М.С. Подгитер О проявлении коротирующих областей взаимодействия солнечного ветра в вариациях интенсивности ГКЛ. // *Солнечно-земная физика. Т. 9. № 1. С. 3–18. 2023.*; DOI: 10.12737/szf-81202201
11. Калинин М.С., Крайнев М.Б., Луо С., Подгитер М.С. О влиянии коротирующих областей взаимодействия солнечного ветра на долговременные вариации интенсивности ГКЛ // *Геомагнетизм и аэрномия, в печати.*
12. Parker, E. N., Cosmic ray modulation by solar wind // *Phys. Rev. Vol. 110. i. 6. p. 1445. 1958*