

## ДИНАМИКА НАПРАВЛЕНИЙ ПРИХОДА ГАЛАКТИЧЕСКИХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ В ПРИСУТСТВИИ КРУПНОМАСШТАБНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА

И.С. Петухов, С.И. Петухов, А.С. Стародубцев

## DYNAMICS IN THE ARRIVAL DIRECTIONS OF GALACTIC COSMIC RAYS IN THE PRESENCE OF LARGE-SCALE SOLAR WIND DISTURBANCES

I.S. Petukhov, S.I. Petukhov, S.A. Startodubtsev

С целью изучения динамики функции распределения галактических космических лучей по направлениям прихода на орбите Земли в присутствии крупномасштабных возмущений развита модель, основанная на анализе множества траекторий релятивистских протонов в межпланетном магнитном поле с учетом токового слоя. В качестве возмущения рассмотрена движущаяся ударная волна, имеющая форму параболоида вращения.

Выявлены три типа траекторий частиц: 1) невозмущенные траектории – траектории частиц, прошедших мимо возмущения; 2) возмущенные траектории – траектории частиц, отразившихся в результате дрейфа на фронте ударной волны; 3) траектории частиц, связанных с самой областью возмущения. Определена динамика распределения этих траекторий на сфере направлений и скоростей межпланетной ударной волны, расположений токового слоя и энергий частиц. Результаты могут быть использованы для выявления предвестников приближающихся возмущений солнечного ветра.

To study of the dynamics of the galactic cosmic ray distribution function in arrival directions on the Earth's orbit in the presence of large-scale disturbances, a model has been developed based on the analysis of trajectory set of the relativistic protons in the interplanetary magnetic field with regard for the current sheet. In the capacity of disturbance, the moving shock wave in shape of a paraboloid of revolution is considered. Three types of particle trajectories have been revealed 1) nonperturbed trajectories which are the trajectories of particles passed by the disturbance; 2) perturbed trajectories which are the trajectories of particles reflected as a result the drift in the shock front; 3) trajectories of the particles associated with the disturbed region itself. The dynamics in the distribution of these trajectories on a sphere of directions and velocities of the interplanetary shock wave, locations of the current sheet and particle energies has been determined. The results can be used to reveal the precursors of solar wind disturbances.

### Введение

Изучение динамики интенсивности космических лучей (КЛ) в присутствии крупномасштабных возмущений солнечного ветра представляет большой интерес в связи с возможностью использования результатов при прогнозировании появления возмущений.

Проведенные исследования показывают, что около 90 % интенсивных геомагнитных возмущений, обусловленных крупномасштабными возмущениями солнечного ветра, имеют явные предвестники [1], при этом важно, что оправдываемость прогноза, основанного на характерном поведении интенсивности КЛ, возрастает при повышении интенсивности возмущения [2]. В настоящее время для достаточно большого числа индивидуальных событий выявлены следующие предвестники (см., например, [2] и ссылки там): 1) предповышение интенсивности КЛ; 2) предпонижение интенсивности КЛ; 3) изменения трехмерной анизотропии КЛ. Реальный метод прогноза с достаточной оправдываемостью может быть основан на адекватной физической модели, описывающей поведение интенсивности КЛ в присутствии возмущения. Вариант модели, в котором учитывается реалистичный спектр турбулентности межпланетного магнитного поля и практически не учитываются реальные свойства солнечного ветра и возмущения, развивает Ruffolo и др. (см. [3] и ссылки там). Мы предлагаем альтернативный вариант модели, в котором учитываются реальные свойства солнечного ветра и возмущения и полностью игнорируется рассеяние КЛ.

### Модель

Модель основана на анализе множества траекторий КЛ, приходящих в магнитосферу Земли с различных направлений. Магнитосфера Земли представлена в

виде сферы радиуса  $10R_E$ , на поверхности которой два угла задают направление прихода КЛ:  $\alpha$  отсчитывается от оси X;  $\beta$  – от плоскости YOZ GSE-системы координат, где  $R_E$  – радиус Земли. Траектории КЛ в межпланетном пространстве определяются численным интегрированием обратно во времени уравнений движения релятивистских протонов различных энергий в заданном электромагнитном поле спокойного солнечного ветра, а также в присутствии возмущения. Магнитное поле солнечного ветра – паркеровское, скорость течения постоянная, радиальная и равна 400 км/с. Электрическое поле солнечного ветра определяется условием вмороженности. В модели учитывается токовый слой, который в представленных иллюстративных результатах принят в виде плоскости, лежащей в плоскости солнечного экватора. Учитывается, что плоскость эклиптики наклонена относительно плоскости солнечного экватора на  $7.25^\circ$ . В расчетах возмущение задано в виде ударной волны, имеющей форму параболоида вращения, ориентация оси симметрии которого определяется двумя углами в гелиоцентрической системе координат. Распределение КЛ в окрестности Земли определяется для нескольких положений возмущения в межпланетном пространстве. КЛ, попадающие на ударный фронт из области перед возмущением, либо отражаются, либо проходят в область возмущения. При расчете дрейфа частиц на ударном фронте электромагнитное поле в области возмущения определяется соотношениями Ренкина–Гюгонио.

### Результаты и обсуждение

На рис. 1, а–в и рис. 2, а–в изображены траектории КЛ с энергией 10 ГэВ, приходящих в магнитосферу Земли с разных направлений, в проекциях на

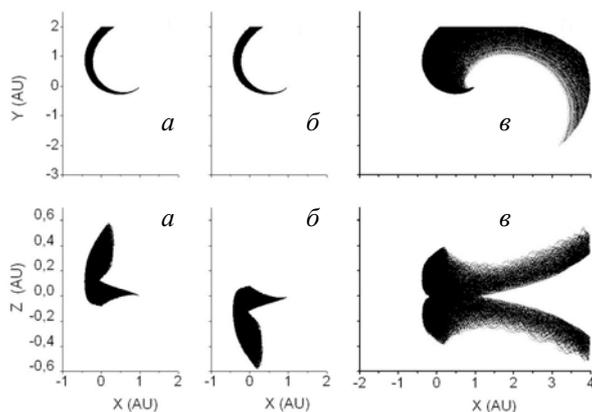


Рис. 1. Область, заполненная траекториями КЛ, приходящими в магнитосферу Земли с разных направлений, в проекции на плоскость YOX (верхние панели) и плоскость ZOX (нижние панели) GSE-системы координаты в случае  $A > 0$  магнитного цикла Солнца. Координаты Земли (0, 0, 0), координаты Солнца (1, 0, 0): *a* – Земля максимально удалена от плоскости солнечного экватора и токового слоя к северу; *б* – то же самое к югу; *в* – Земля находится в плоскости солнечного экватора и токового слоя.

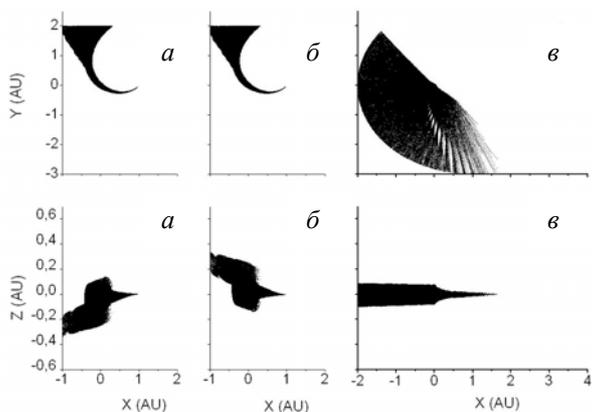


Рис. 2. То же самое, что и на рис. 1, в случае  $A < 0$  магнитного цикла Солнца.

плоскость YOX (верхние панели) и плоскость ZOX (нижние) GSE-системы координат. Направление прихода частиц определяется двумя углами, значения которых задаются, исходя из квазиравномерного заполнения поверхности сферы. Для каждого варианта рассчитано порядка 5500 траекторий. Результаты, представленные на рис. 1, *a–в* и рис. 2, *a–в* соответствуют  $A > 0$  ( $A < 0$ ) магнитному циклу Солнца, при котором силовые линии магнитного поля в северной полусфере направлены от Солнца. Буквенные обозначения рисунков соответствуют разным положениям Земли относительно плоскости солнечного экватора: 1, *a* и 2, *a* – максимальное удаление к северу; 1, *б* и 2, *б* – максимальное удаление к югу; 1, *в* и 2, *в* – плоскость солнечного экватора.

Как видно из рис. 1, *a, б* и 2, *a, б* КЛ, приходящие в магнитосферу Земли с разных направлений в эти моменты времени, в межпланетном пространстве занимают область, соответствующую в проекции на плоскость YOX магнитной силовой трубке. Форма области отражает результирующее движение КЛ в межпланетном магнитном поле (ММП): они приходят из-за пределов орбиты Земли и возвращаются

обратно после отражения от магнитной пробки, оставаясь в той же магнитной трубке.

Результирующее движение КЛ зависит от направления магнитного поля: в магнитном поле, силовые линии которого направлены от Солнца, релятивистские протоны, движущиеся к Солнцу, перемещаются также в направлении к южному полюсу, а при движении от Солнца – к северному полюсу. В магнитном поле с противоположным направлением направление результирующего движения также меняется на противоположное. При  $A > 0$  форма области в проекции на плоскость ZOX (нижние панели рис. 1, *a–б*) обусловлена касательным (слабым) воздействием токового слоя, расположенного при  $z=0$ , на смещение траекторий протонов. При смене знака магнитного цикла Солнца ( $A < 0$ ) протоны полностью пересекают токовый слой, чем и обусловлено его более сильное воздействие на смещение траекторий (сравните рис. 1, *a, б* и 2, *a, б* соответственно). Наиболее сильное воздействие на смещение траекторий КЛ токовый слой оказывает в те моменты времени, когда Земля находится вблизи него (рис. 1, *в* и 2, *в*). При  $A > 0$  проекцией области, занимаемой КЛ, на плоскость YOX по-прежнему является силовая трубка, однако значительно больших размеров, а проекция на плоскость ZOX состоит из двух частей, расположенных зеркально относительно токового слоя (рис. 1, *в*). При  $A < 0$  КЛ главным образом дрейфуют вдоль токового слоя, в результате чего их относительно мало находится между орбитой Земли и Солнцем, а занимаемая ими область имеет небольшой размер (порядка ларморовского радиуса протона) вдоль оси Z (рис. 2, *в*).

Очевидно, что динамика анизотропии интенсивности КЛ может происходить только в том случае, когда возмущение пересекает область, занимаемую КЛ. Из представленных на рисунках результатов можно заключить, что наибольшие шансы регистрации предвестника возмущения реализуются во время нахождения Земли вблизи токового слоя, лежащего в плоскости солнечного экватора, при  $A > 0$  магнитном цикле Солнца. Наименьшие шансы регистрации предвестника реализуются в то же время при  $A < 0$ . Во время нахождения Земли вдали от токового слоя вероятность регистрации предвестника возмущения зависит от угловой ширины возмущения: при малой угловой ширине предвестники западных возмущений могут регистрироваться с большой заблаговременностью, предвестники центральных и восточных возмущений – практически только перед приходом возмущения на орбиту Земли; при большой угловой ширине предвестник будет регистрироваться в течении всего времени движения возмущения.

На рис. 3, *a–в* приведена динамика траекторий КЛ (протонов с энергией 10 ГэВ) на сфере направлений их прихода в магнитосферу Земли для трех положений в межпланетном пространстве центрального возмущения. Задано, что каждый участок ударного фронта движется с постоянной радиальной скоростью 1000 км/с. Отношение продольного размера возмущения к поперечному принято как 2:1.

При построении рисунка использованы следующие обозначения: пустая область занята траекториями

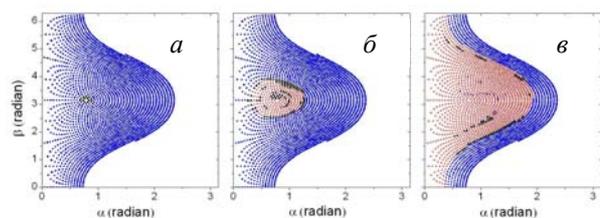


Рис. 3. Направления прихода КЛ в магнитосферу Земли для трех положений центрального возмущения:  $a - R_S = 0.1$  а.е.;  $b - R_S = 0.5$  а.е.;  $c - R_S = 0.9$  а.е.

КЛ, идущих к Солнцу из внешней по отношению к орбите Земли области; область, отмеченная круглыми символами, – траектории КЛ, движущихся от Солнца и отраженных от магнитной пробки; область, отмеченная крестиками, – траектории КЛ, движущихся от Солнца и отраженных от ударного фронта возмущения; область отмеченная черными треугольными символами, – траектории КЛ, движущихся от Солнца и приходящих из внутренней области возмущения после пересечения ударного фронта. Как видно из рисунка динамика траекторий КЛ, отмеченных на сфере направлений их прихода, состоит в общем расширении области, занятой отраженными от ударного фронта КЛ, а также изменениях направлений прихода КЛ, пришедших из области за ударным фронтом.

КЛ, направления прихода которых приходятся на пустую и отмеченную точками области, с возмущением не связаны. КЛ, направления прихода которых приходятся на область, отмеченную крестиками, обеспечивают предповышение интенсивности КЛ, поскольку при отражении протонов от движущегося навстречу ударного фронта происходит увеличение их энергии и соответствующее возрастание амплитуды. КЛ, направления прихода которых приходятся на область, отмеченную черными треугольниками, обеспечивают предпонижение интенсивности КЛ, поскольку их траектории связаны с областью пониженной интенсивности КЛ (область форбуш-понижения). Следует отметить, что, как это видно из рис. 3,  $a-c$ , предпонижение и предповышение сначала формируется на направлениях прихода КЛ, имеющих небольшой питч-угол ( $\alpha = \pi/4$ ,  $\beta = \pi$ ), а затем распространяется на КЛ с большим питч-углом, как это обычно наблюдается (см., например, [4]). Наблюдающуюся коллимацию потока КЛ, ответственных за предпонижение, авторы и др. [5] связывают только с большой разницей напряженностей магнитных полей в областях внутри и снаружи возмущения. Согласно модели дополнительная коллимация потока КЛ происходит при его распространении в неоднородном магнитном межпланетном поле от возмущения до орбиты Земли.

Кроме того, согласно измерениям область, занятая предповышением интенсивности КЛ, перед приходом возмущения имеет большие угловые размеры, что вполне соответствует модели.

### Заключение

Применимость модели траекторий КЛ для описания динамики анизотропии интенсивности КЛ в присутствии крупномасштабного возмущения солнечного ветра может быть обусловлена тем, что рас-

стояние между возмущением – источником формирования анизотропии – и орбитой Земли – местом ее регистрации – меньше длины свободного пробега релятивистских протонов до рассеяния. Посредством расчета множества траекторий КЛ в заданном межпланетном магнитном поле определена форма области, занимаемой релятивистскими протонами, приходящими в магнитосферу Земли с разных направлений, для разных положений Земли и в зависимости от магнитного цикла Солнца. В присутствии возмущения солнечного ветра траектории КЛ на сфере направлений их прихода в магнитосферу Земли делятся на три типа: 1) траектории КЛ, идущих к Солнцу из внешней по отношению к орбите Земли области и идущих от Солнца после их отражения от магнитной пробки; 2) траектории КЛ, идущих от Солнца после их отражения от движущегося ударного фронта возмущения; 3) траектории КЛ, идущих от Солнца после их выхода из внутренней области возмущения и пересечения ударного фронта. Траектории КЛ 1-го типа не связаны с возмущением, траектории КЛ 2-го типа обеспечивают предповышение интенсивности, а траектории КЛ 3-го типа обеспечивают ее предпонижение. Динамика анизотропии интенсивности КЛ, обусловленная движением возмущения, состоит в изменении конфигурации областей на сфере направлений, принадлежащих траекториям КЛ разного типа. По мере движения возмущения питч-углы КЛ, траектории которых относятся ко 2-му и 3-му типам, возрастают, что объясняется выполнением 1-го адиабатического инварианта. Модельные расчеты выявили сильное влияние, которое может оказывать токовый слой на траектории КЛ, затрудняющее при некотором положении Земли регистрацию предвестника возмущения. При этом степень влияния в большей мере обусловлена тем, что в расчетах плоскость токового слоя выбрана совпадающей с плоскостью солнечного экватора, что, в свою очередь, больше соответствует эпохе минимума солнечной активности.

В годы максимума солнечной активности, когда возникает большинство возмущений, влияние может быть существенно ослаблено, поскольку в это время угол между плоскостью токового слоя и плоскостью солнечного экватора большой.

Работа выполнена при поддержке гранта «Научная школа» Крымского Г.Ф. 422.2003.2.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Munakata K. et al. // J. Geophys. Res. 2000. V. 105, N 27. P. 457.
2. Dorman L.I. et al. // Proc 28<sup>th</sup> Int. Cosmic Ray Conf. Tokyo, 2003. N 6/7. P. 3553.
3. Leerungnavarat K., Ruffolo D., Bieber J.W. // Astrophys. J. 2003. V. 593. P. 587.
4. Nonaka T. et al. // Proc. 28<sup>th</sup> Int. Cosmic Ray Conf. Tokyo, 2003. N 6/7. P. 3569.
5. Nagashima K. et al. // Planet. Space Sci. 1992. V. 40. P. 1109.