

## ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В СОЛНЕЧНОМ ВЕТРЕ И ИХ ОТРАЖЕНИЯ В ТЕНЗОРНОЙ АНИЗОТРОПИИ

П.Ю. Гололобов, Г.Ф. Крымский, П.А. Кривошапкин, С.К. Герасимова, В.Г. Григорьев

### STUDY OF FEATURES OF DYNAMIC PROCESSES IN SOLAR WIND AND THEIR REFLECTIONS IN TENSOR ANISOTROPY

P.Yu. Gololobov, G.F. Krymsky, P.A. Krivoshapkin, S.K. Gerasimova, V.G. Grigoryev

Получены параметры векторной и тензорной анизотропии по данным глобальной сети нейтронных мониторов с помощью метода глобальной съемки. При сравнении полученных параметров анизотропии с ранними результатами в мюонной компоненте обнаружено различие. Обсуждаются возможные причины этого явления.

Parameters of a vector and tensor anisotropies by the data of global neutron monitor network using the global survey method are obtained. The disagreement between the obtained parameters and the early results in muon components is found. A possible reason of this phenomena is discussed.

#### Введение

Отклонения космических лучей (КЛ) от изотропного распределения по направлениям их движения очень малы – менее одного процента, однако их всестороннее изучение вполне оправдано, поскольку они несут информацию о динамических свойствах солнечного ветра. Для изучения анизотропии столь малой величины требуются особые методы обработки данных и их комплексного анализа. Такие методы были разработаны и описаны в работе [Крымский и др., 1981].

Анизотропия КЛ описывается первой сферической гармоникой по направлениям движения частиц и может быть представлена трехмерным вектором. Наряду с векторной существует анизотропия другого рода – тензорная анизотропия, которую следует описывать второй сферической гармоникой по направлениям движения, 5 компонент которой в системе координат с полярным и азимутальным углами  $\theta$ ,  $\varphi$  имеют вид (см. [Крымский и др., 1967]):

$$\Omega_1 = \sqrt{3}(\cos^2\theta - 1/3), \quad \Omega_2 = \sin 2\theta \cos \varphi,$$

$$\Omega_3 = \sin 2\theta \sin \varphi, \quad \Omega_4 = \sin^2\theta \cos 2\varphi,$$

$$\Omega_5 = \sin^2\theta \sin 2\varphi.$$

Соответствующие коэффициенты разложения  $(a_2^0, a_2^1, b_2^1, a_2^2, b_2^2)$  можно представить в виде пятимерного вектора анизотропии  $\vec{A}$ . Если к распределению интенсивности, описываемому второй сферической гармоникой добавить изотропную часть, то получим еще один геометрический образ тензорной анизотропии – трехосный эллипсоид. Ориентация эллипсоида по отношению к системе координат описывается тремя углами Эйлера, а сам эллипсоид – двумя эксцентриситетами.

Наконец, эта анизотропия может быть представлена симметричной матрицей  $T$  с заданным шпуром, что тоже требует 5 независимых компонент. При изменениях системы угловых координат компоненты матрицы  $T$  преобразуются, т. е. она является тензором. Упомянутый трехосный эллипсоид является поверхностью, описываемой уравнением  $(\vec{\Omega}T^{-1}\vec{\Omega}) = 1$  и называемой еще вторым тензорным эллипсоидом.

Ранее, в работе [Крымский и др., 2013] нами был вычислены сезонные ходы антисимметричной су-

точной  $R_1^1$  и полусуточной  $R_2^2$  вариаций по данным мюонных телескопов Якутского спектрографа ([www.ysn.ru/ipm](http://www.ysn.ru/ipm)) и многонаправленного мюонного телескопа ст. Нагоя ([www.stelab.nagoya-u.ac.jp/stelab/www1/div3/muon](http://www.stelab.nagoya-u.ac.jp/stelab/www1/div3/muon)). Для вычислений использовались разработанные в ИКФИА СО РАН в 1960-х гг. методы приемных векторов и скрещенных телескопов [Крымский и др., 1981], которые учитывали влияние геомагнитного поля и атмосферных эффектов. Полученные результаты показывали наличие постоянного годового хода  $R_2^1$  и  $R_2^2$  в течение 40-летнего периода.

В данной работе в дополнение к ранее полученным результатам в мюонной компоненте вычислены параметры векторной и тензорной анизотропий в нейтронной компоненте с помощью метода глобальной съемки по данным мировой сети нейтронных мониторов и проведено сравнение с параметрами  $R_1^1$ ,  $R_2^1$  и  $R_2^2$  полученных в мюонной компоненте и предложены механизмы их происхождения.

#### Методика нахождения анизотропии

Описанный ниже метод определения анизотропии по данным мировой сети нейтронных мониторов подробно изложен в [Крымский и др., 1981] и получил название «метода глобальной съемки».

Интенсивность КЛ, регистрируемая прибором, зависит от распределения интенсивности по телесному углу  $J(\Omega)$  и от диаграммы направленности  $R(\Omega)$ :

$$I = \int J(\Omega)R(\Omega)d\Omega.$$

Если разложить диаграмму направленности прибора по сферическим функциям и взять коэффициенты разложения, относящиеся ко 2-й сферической гармонике  $(x_2^0, x_2^1, y_2^1, x_2^2, y_2^2) \equiv \vec{R}$ , то получим вклад тензорной анизотропии в интенсивность, регистрируемой прибором:

$$\delta I = \vec{R} \cdot \vec{A}.$$

Если имеется множество приборов с векторами  $R_i$ , то вектор  $\vec{A}$  может быть найден из системы линейных уравнений по их показаниям  $\delta I_i$ .

Пятимерный вектор  $\vec{R}$ , называемый приемным вектором, должен определяться в системе координат,

связанной с вращающейся Землей, где он сохраняется постоянным. В то же время вектор  $\vec{A}$  возникает вследствие динамических процессов в солнечном ветре и должен определяться в системе координат, связанной с Солнцем.

Если в солнечной системе координат анизотропия постоянна, то параметры суточной вариации будут закономерно меняться в течение года вследствие того, что меняется ориентация оси вращения Земли.

Таким образом, медленно меняющаяся анизотропия может быть найдена методом суточных вариаций. В случае же быстрых изменений она должна будет определяться по показаниям набора нескольких приборов.

Следует сделать несколько замечаний относительно построения векторов  $\vec{R}_i$ . Взятая за основу диаграмма направленности  $R(\Omega)$  строится с учетом географического положения каждого прибора, его апертуры, с учетом направления траекторий КЛ в геомагнитном поле, разного для частиц разных энергий, с учетом спектра анизотропии и коэффициентов связи.

### Полученные результаты

В работе [Крымский и др., 2014] нами были получены параметры тензорной анизотропии (антисимметричной суточной и полусуточной вариаций) по данным мюонных телескопов ст. Якутск и Нагоя. Регулярный годовой ход, который эти параметры обнаруживают, обусловлен двумя возможными причинами: изменения ориентации земной оси в солнечной системе координат и смещение Земли по гелиошироте. Эти изменения различаются по фазе и, следовательно, могут быть разделены в наблюдениях. Основная часть полусуточной вариации создается экранировочным механизмом [Крымский, 1981; Skripin, 1968], а антисимметричная суточная, главным образом, сдвиговым течением [Бережко, 1981; Бережко и Крымский, 1981]. Оказалось, что экстремум гелиоширотных изменений приходится не на экватор, а на гелиошироту  $\approx 4.5^\circ S$ . Это подтверждает известный факт смещения низкоширотного слоя в солнечном ветре к югу.

Здесь приводятся результаты обработки данных глобальной сети нейтронных мониторов. На рис. 1 результаты представлены на 24-часовом и 12-часовом циферблатах. Показаны изменения параметров в течение года. Данные сглажены 1-й и 2-й гармониками (годовой и полугодовой вариацией). На этом же рисунке показаны результаты мюонных измерений из работы [Крымский и др., 2013]. Наблюдается общее соответствие тех и других данных с учетом того, что средние энергии частиц, вносящих вклад в нейтронную интенсивность значительно меньше, чем в мюонах. Так как спектр тензорной анизотропии растет с энергией, нейтронная компонента обнаруживает вариации, меньшие по величине, чем в мюонах. Разительное отличие обнаруживается в среднегодовой антисимметричной вариации, которая в нейтронах значительно больше. Обсудим природу этого эффекта. Упомянутый выше механизм тензорной

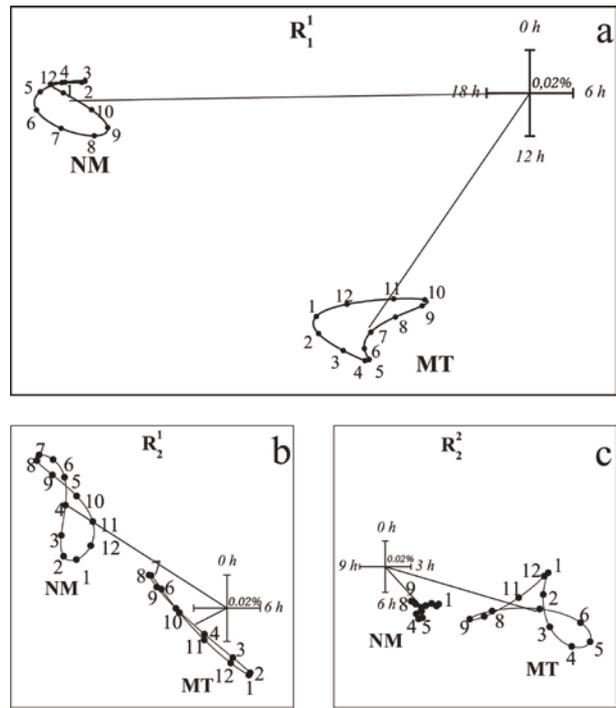


Рис. 1. Годовой ход векторной анизотропии  $R_1^1$  (a) и компонент тензорной анизотропии  $R_2^1$  (b),  $R_2^2$  (c) по данным многонаправленного мюонного телескопа ст. Нагоя (MT) и сети нейтронных мониторов (NM). Цифрами возле точек на кривой обозначены месяцы.

анизотропии, обусловленный сдвиговым течением солнечного ветра, является примером более общего явления. Тензорная анизотропия будет возникать всякий раз, когда есть градиент тока КЛ. Причиной этого градиента может быть не только сдвиговое течение, но и любые условия, создающие неоднородность солнечного ветра, например, наличие магнитных пробок. В работе [Крымский и др., 2014] обсуждался эффект понижения КЛ в зоне взаимодействия быстрого и медленного потоков солнечного ветра, обусловленный возникновением магнитной пробки. Такое взаимодействие происходит в окрестности нейтральной поверхности межпланетного магнитного поля. Соответственно в этой области должен преобладать радиальный вынос КЛ и дефицит компенсирующего диффузионного тока вдоль поля. На границах зоны взаимодействия, наоборот, должен наблюдаться избыточный диффузионный ток, необходимый для сохранения баланса КЛ.

Ток КЛ, создающий обыкновенную (векторную) анизотропию, возникает как результат баланса конвекционного и диффузионного тока (a и b на рис. 2) Когда баланс нарушается, например, вследствие гелиоширотных различий, он сохраняется только в среднем. Это соответствует ситуации, изображенной на 2-й и 3-й частях рисунка. Возникающий градиент тока (4-я часть рисунка) как северо-южная асимметрия тока соответствует направлению межпланетного магнитного поля. Указанный эффект, по видимому, является причиной среднегодовой антисимметричной суточной вариации в нейтронной компоненте.

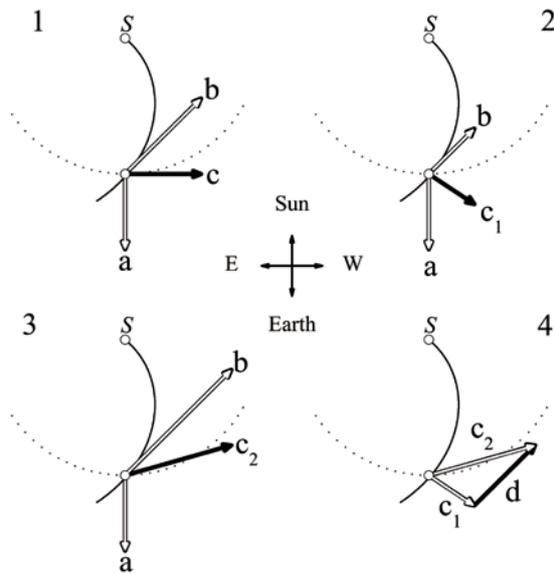


Рис. 2. Баланс конвективной (a) и диффузионной (b) токов и их локальное возмущение. 1 – правильный баланс; 2, 3 – дефицит и избыток диффузионного тока; 4 – разностный ток (d) указывающий на возникновение градиента тока вдоль магнитного поля. Пунктирной кривой указана орбита вращения Земли, а сплошная кривая – силовые линии межпланетного магнитного поля.

### Заключение

Тензорная анизотропия по наблюдениям нейтронными мониторами в целом соответствует анизотропии, наблюдаемой в мюонной компоненте, если принять во внимание различие в энергии частиц. Однако, среднегодовой вектор антисимметричной суточной вариации оказался неожиданно большим. В работе показано, что это свойство можно понять как результат взаимодействия быстрых и медленных потоков солнечного ветра, при условии что его структуры сдвинуты к югу. При этом сделано обобщение известного механизма тензорной анизотропии, связанного со сдвиговым течением ветра.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты № 13-02-00989-а, 13-02-00585-а, 15-42-05083-р\_восток\_а, 15-42-05085-р\_восток\_а), Программы фундаментальных исследований Президиума РАН № 31, гранта Президента РФ по государственной поддержке ведущих научных школ (№ НШ-3269.2014.2).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Бережко Е.Г., Крымский Г.Ф. Кинетическое рассмотрение процесса ускорения заряженных частиц в сдвиговых течениях бесстолкновительной плазмы. // Письма в Астрон. журн. 1981. Т. 7, № 10. С. 636–640.

Бережко Е.Г. Ускорение заряженных частиц в сдвиговых течениях космической плазмы // Письма в ЖЭТФ. 1981. Т. 33, № 8. С. 416–419.

Герасимова С.К., Гололобов П.Ю., Кривошапкин П.А., Крымский Г.Ф. Исследование полусуточной вариации галактических космических лучей // Известия РАН. Серия физическая. 2013. Т. 77, № 5. С. 590–592.

Крымский Г.Ф., Кузьмин А.И., Кривошапкин П.А. и др. Космические лучи и солнечный ветер. Новосибирск: Наука, 1981. 224 с.

Крымский Г.Ф., Кривошапкин П.А., Герасимова С.К. и др. Тензорная анизотропия космических лучей // Письма в Астрон. журн. 2014. Т. 40, № 4. С. 260–263.

Skripun G.V., Krivoshapkin P.A., Krymsky G.F., Kuzmin A.I. The second spherical harmonic of the diurnal variation and the orientation of the interplanetary magnetic field // Canadian J. Phys. 1968. V. 46, N 10. P. 973–975.

Институт космофизических исследований и астрономии им. Ю.Г. Шафера, Якутск, Россия