

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

ГЕОМАГНЕТИЗМ
И
АЭРОНОМИЯ

(ОТДЕЛЬНЫЙ ОТТИСК)

МОСКВА

Выводы

1. Магнитное возмущение в экваториальной плоскости внутренней части магнитосферы ($\rho < 10R_E$) удовлетворительно описывается полиномом $\delta B_z = s_0 + a_1 x + s_1 \rho^2 + s_2 \rho^4$, где s_0 , s_1 и s_2 — полиномиальные коэффициенты для азимутально-симметричной части возмущения, Dst — коэффициент при первой гармонике азимутально-асимметричной части.

2. Коэффициенты полинома связаны с Dst -вариацией и динамическим давлением солнечного ветра ρ соотношениями (5)—(8), коэффициенты s_0 и s_1 зависят главным образом от Dst . Коэффициенты s_1 и s_2 обусловлены кольцевым током. Коэффициент s_0 представляет собой однородную гармонику возмущения, создаваемого токами в хвосте магнитосферы, на магнитопаузе, и кольцевым током.

3. Коэффициент азимутально-асимметричной части a_1 определяется, вероятно, токами в хвосте и на магнитопаузе и зависит в основном от динамического давления солнечного ветра. Эти токи сдвигают минимум δB_z на ночную сторону на расстояние порядка земного радиуса.

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований, проект № 94-05-16638.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sugiura M. Quiet time magnetospheric field depression at 2.3—3.6 R_E //J. Geophys. Res. 1973. V. 78. № 16. P. 3182—3185.
2. Sugiura M., Poros D. J. A magnetospheric field incorporating the Ogo 3 and 5 magnetic field observations//Planet. Space Sci. 1973. V. 21. № 10. P. 1763—1773.
3. Iijima T., Potemra T. A., Zanetti L. J. Large-scale characteristics of magnetospheric equatorial currents//J. Geophys. Res. 1990. V. 95. № A2. P. 991—999.
4. Singer H. J., Hughes W. J. Magnetic field observations of the ring current by CRRES//Proc. Intern. Conf. Magnetic Storms. Rikubetsu, Hokkaido, Japan. October 6—8, 1994. P. 33—35.
5. Fairfield D. H., Tsyganenko N. A., Usmanov A. V., Malkov M. V. A large magnetosphere magnetic field database//J. Geophys. Res. 1994. V. 99. P. 11319.
6. Mead G. D. Deformation of the geomagnetic field by the solar wind//J. Geophys. Res. 1964. V. 69. № 7. P. 1181—1195.
7. Tsyganenko N. A. A magnetospheric magnetic field model with a warped tail current sheet//Planet. Space Sci. 1989. V. 37. № 1. P. 5—20.

Полярный геофизический институт
Кольского научного центра РАН

Поступила в редакцию
07.02.95

После доработки
13.09.95

УДК 523.62-337

© 1996 г. С. А. Стародубцев, И. А. Транский, М. И. Веригин, Г. А. Котова

ФЛУКТУАЦИИ ИНТЕНСИВНОСТИ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ И МЕЖПЛАНЕТНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ В ОБЛАСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПОТОКОВ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА С РАЗЛИЧНОЙ СКОРОСТЬЮ

Рассматриваются флуктуации интенсивности космических лучей (КЛ) высоких энергий, межпланетного магнитного поля (ММП) и параметров плазмы во время прохождения орбиты Земли высокоскоростными потоками солнечного ветра. На основании проведенного анализа указанных данных и сравнения соответствующих теоретических соотношений, описывающих связь спектральных характеристик КЛ и ММП с экспериментом, делается вывод о том, что флуктуации КЛ, наблюдаемые в области взаимодействия потоков солнечного ветра с различной скоростью, обусловлены модулирующим взаимодействием на поток КЛ быстрых магнитозвуковых волн с характерными пространственными масштабами $\sim 10^{10}$ — 10^{11} см.

Введение

К настоящему времени можно считать установленным, что флуктуации (короткопериодные вариации с характерными временами от ~ 1 мин до ~ 1 ч) интенсивности космических лучей (КЛ) имеют межпланетное происхождение [1]. В частности, в результате изучения флуктуаций

**Значения полиномиальных коэффициентов в различных диапазонах
Dst и *p***

| | | | |
|------------------|---------------------------------|------------------------|-----------------------|
| 4 < <i>p</i> < 7 | <i>N</i> = 29 | 140 | 107 |
| | <i>s</i> ₀ = -83,6 | -48,6 | -22,2 |
| | <i>s</i> ₁ = 2,06 | 0,81 | 0,37 |
| | <i>s</i> ₂ = -0,010 | -0,001 | 0,001 |
| | <i>a</i> ₁ = 2,87 | 4,62 | 4,70 |
| 2 < <i>p</i> < 4 | <i>N</i> = 88 | 435 | 322 |
| | <i>s</i> ₀ = -85,7 | -54,8 | -27,3 |
| | <i>s</i> ₁ = 1,82 | 1,17 | 0,60 |
| | <i>s</i> ₂ = -0,0095 | -0,0054 | -0,0027 |
| | <i>a</i> ₁ = 3,41 | 3,94 | 3,75 |
| 0 < <i>p</i> < 2 | <i>N</i> = 110 | 62 | 489 |
| | <i>s</i> ₀ = -108 | -51,5 | -35,8 |
| | <i>s</i> ₁ = 2,31 | 1,18 | 0,86 |
| | <i>s</i> ₂ = -0,012 | -0,0066 | -0,0048 |
| | <i>a</i> ₁ = 1,13 | 2,12 | 2,13 |
| | -100 < <i>Dst</i> < -50 | -50 < <i>Dst</i> < -10 | -10 < <i>Dst</i> < 30 |

Заметим, что остаточная ошибка в нашей модели, равная 44%, в 2 раза меньше, чем в модели [7], зависящей от *K_p*-индекса.

На рис. 2 в качестве иллюстраций представлены карты экваториального возмущения магнитного поля в круге *p* < 10*R_E*, построенные по выражениям (2) с учетом (5)—(8) для двух значений *Dst* (-50 и -100 нТл) и двух значений *p* (1 и 3 нПа). Минимум возмущения сдвинут на ночную сторону из-за наличия азимутально-асимметричной гармоники.

Обсуждение

Коэффициенты *s*₀, *s*₁ и *s*₂ азимутально-симметричной части поля в уравнениях (2), (5)—(7) обусловлены токами в хвосте магнитосферы, на магнитопаузе, и кольцевым током. В экваториальной плоскости невозможно разделить вклады кольцевого тока и остальных источников. Обращает на себя внимание довольно большая (по модулю) величина однородной гармоники *s*₀. Даже при *Dst* = 0 она равна -27 нТл. Поскольку токи на магнитопаузе в спокойное время создают возмущение ~ 20 нТл [6], эффект кольцевого тока и токов в хвосте в спокойных условиях -50 нТл.

Можно предположить, что коэффициент *a*₁ обусловлен влиянием токов в хвосте и на магнитопаузе. Интересно сравнить этот коэффициент с тем, который предсказывается моделью Мида [6]

$$a_1^{Mead} = 2,1 \cdot 10^4 / L_1^4 \text{ (нТл/} R_E \text{)}, \quad (9)$$

где *L*₁ — расстояние до солнечной точки на магнитопаузе (в радиусах Земли). Обычно принимается

$$L_1 \approx 10,9 (p_0/p)^{1/6}, \quad (10)$$

где *p*₀ = 2 нПа — давление солнечного ветра в спокойных условиях. Подставляя (10) в (9), получаем

$$a_1^{Mead} \approx 0,94 p^{2/3}. \quad (11)$$

Показатели степени в (11) и (8) довольно близки. Эмпирическое значение *a*₁ примерно в 2 раза больше мидовского, что связано, вероятно, с влиянием токов хвоста, которые в модели [6] не учитывали.

Первая азимутально асимметричная гармоника имеет компоненты

$$\delta B_z^{asy} = a_1 x, \quad \delta B_x^{asy} = a_1 z, \quad \delta B_y^{asy} = 0. \quad (12)$$

Поле (12), как нетрудно убедиться, безвихревое, т. е. создается удаленными токами. В работе [3] приводятся результаты измерений поля вблизи экваториальной плоскости. Поле δB_z^{asy} получено близким к нашему. При вычислении токов авторы [3] положили $\partial(\delta B_x^{asy})/\partial z = 0$, получив таким образом сильную долготную асимметрию кольцевого тока (ночью ток в 2—3 раза сильнее, чем днем). Однако условие $\partial(\delta B_z^{asy})/\partial z = 0$ не имеет под собой достаточных оснований.

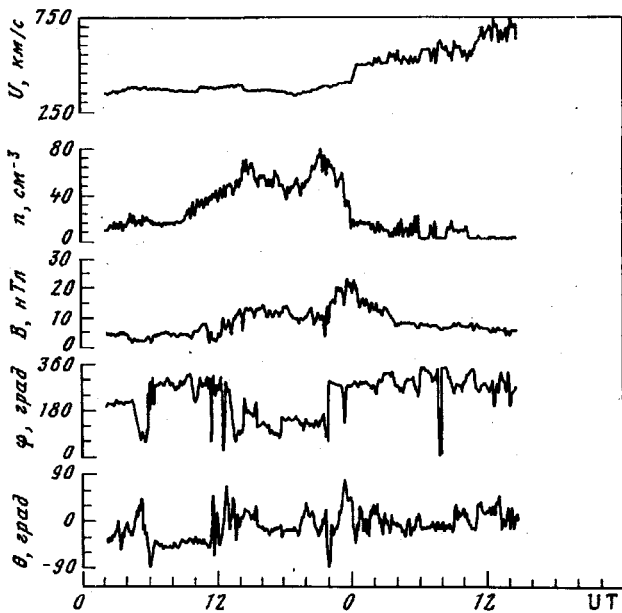


Рис. 1. Данные измерений на КА «Прогноз-9» параметров плазмы солнечного ветра и ММП в области взаимодействия потоков с различной скоростью 29—30 августа 1983 г. Сверху вниз: U — скорость солнечного ветра, n — концентрация плазмы, B — модуль ММП, φ и θ — углы ММП в солнечно-эклиптической системе координат

интенсивности КЛ во время прохождения орбиты Земли высокоскоростными потоками солнечного ветра установлено, что до начала форбуш-понижений в частотных спектрах наблюдается неравномерное распределение мощности флуктуаций КЛ, происходящее на уровне общего шума. Непосредственно во время крупномасштабных возмущений солнечного ветра мощность флуктуаций превышает 95%-ный доверительный уровень, но распределена равномерно по всему частотному диапазону [1]. Совместный анализ флуктуаций модуля межпланетного магнитного поля (ММП) и КЛ показал, что на секторных границах в области взаимодействия потоков солнечного ветра с различной скоростью наблюдается усиление флуктуаций модуля ММП и интенсивности КЛ, имеет место дискретная структура поля и частиц КЛ, а также наблюдается соответствие периодов флуктуаций с $10 < T < 200$ мин, что указывает на обусловленность динамики спектра флуктуаций КЛ динамикой спектра неоднородностей ММП [2—5]. Авторы работ [3—5] также оценили пространственные масштабы неоднородностей ММП ($\sim 10^{10}$ — 10^{11} см), которые, по их мнению, обусловлены локальными возмущениями параметров плазмы солнечного ветра, источник которых находится вблизи проекции секторной границы на Солнце. С другой стороны, в данных работах не уточняется тип мелкомасштабных МГД-возмущений солнечного ветра, которые обуславливают динамические изменения в спектрах флуктуаций КЛ.

Ниже сделана попытка показать, что флуктуации КЛ при прохождении орбиты Земли высокоскоростными потоками солнечного ветра вызваны взаимодействием потока КЛ с быстрой магнитозвуковой турбулентностью, развитой в области взаимодействия потоков с различной скоростью.

Анализ данных и результаты

Для понимания механизма возникновения флуктуаций КЛ, наблюдаемых в области взаимодействия потоков солнечного ветра с различной скоростью, необходимо совместное рассмотрение данных регистрации интенсивности КЛ на Земле и полного набора прямых измерений ММП и параметров плазмы солнечного ветра в окрестности Земли. Для достижения этой цели в данной работе использованы 5-минутные, исправленные на давление, данные регистрации нейтронного монитора обс. Тикси и измерения ММП и параметров плазмы солнечного ветра, выполненные на КА «Прогноз-9» в июле 1983 г.— феврале 1984 г. Из данных были отобраны шесть событий прохождения орбиты Земли высокоскоростными потоками солнечного ветра, во время которых в интенсивности КЛ наблюдались небольшие форбуш-понижения с амплитудой $\delta I/I \leq 2\%$. Эти события: 23.05 UT 5 июля; 00.05 UT 7 июля; 23.10 UT 8 июля; 17.15 UT 9 июля; 02.10 UT 29 августа; 14.45 UT 30 августа; 23.05 UT 7 сентября; 04.00 UT 9 сентября; 23.05 UT 24 сентября; 09.45 UT 26 сентября; 15.55 UT 28 октября

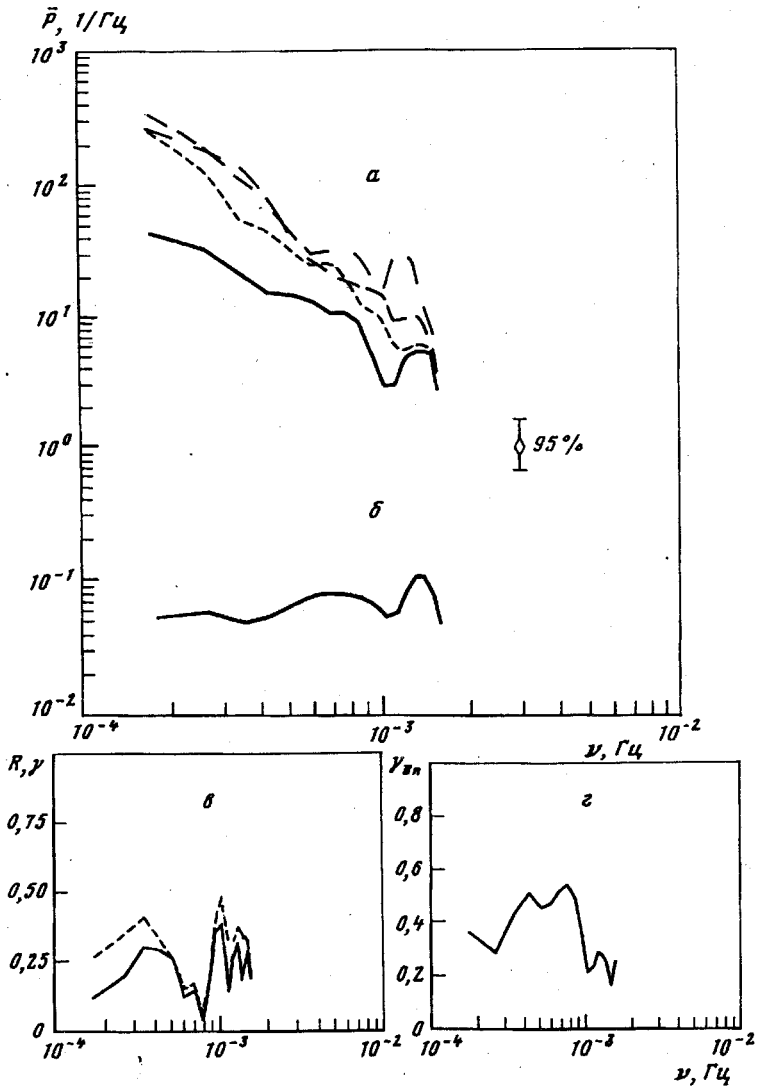


Рис. 2. Нормированные спектры мощности флуктуаций компонент (штриховые кривые) и модуля ММП (сплошная кривая) (а) и флуктуаций КЛ (б). Указан 95%-ный доверительный интервал. Параметры поляризации R и γ флуктуаций ММП (в); коэффициент когерентности γ_{Bn} (г) для периода времени 02.10 UT 29 августа — 14.45 UT 30 августа 1983 г.

и 22.20 UT 29 октября. В эти времена также отмечались пересечения Землей секторных границ ММП.

Для примера на рис. 1 приведены данные измерений ММП и параметров плазмы солнечного ветра за 29—30 августа 1983 г. Из рис. 1 видно, что в области взаимодействия потоков солнечного ветра с различной скоростью перед межпланетной ударной волной увеличиваются концентрация плазмы n и модуль ММП B , а также усиливаются их флуктуации, что может привести к раскачке магнитозвуковых волн [6]. Кроме того, согласно [7] в межпланетном пространстве в это время отмечались значительные потоки надтепловых частиц. Это также дает основание предположить, что в рассматриваемый интервал времени в области взаимодействия потоков солнечного ветра могут быть развиты мелкомасштабные МГД-возмущения типа быстрых магнитозвуковых волн [8, 9]. Если это действительно так, то согласно работе [10], в спектре флуктуаций КЛ высоких энергий должны проявиться соответствующие динамические изменения, отражающие модулирующее воздействие быстрых магнитозвуковых волн на поток КЛ.

Для обоснования этого предположения необходимо провести спектральный анализ данных: рассчитать оценки авто- и взаимных спектральных плотностей, коэффициента когерентности между

флуктуациями ММП и параметров плазмы солнечного ветра, выполнить расчеты поляризационных характеристик ММП. Методика такого расчета подробно изложена в работе [11], а ниже на рис. 2 приведены его результаты. Из рис. 2б видно, что в данное время в нормированном спектре флуктуаций КЛ в области частот $\nu \sim 10^{-3}$ Гц наблюдается резко выделенный пик, превышающий 95%-ный доверительный интервал. Подобный пик, выраженный в разной степени, присутствует также в нормированных спектрах модуля и компонент ММП (рис. 2а), причем мощность компонент поля сравнима по величине с мощностью модуля ММП, что указывает на флуктуации не только направления, но и величины ММП, характерные при проявлении свойств магнитозвуковой турбулентности. Проведенный статистический поляризационный анализ (рис. 2в) показал наилучшее согласие в этой области частот для степени поляризации R и коэффициента когерентности компонент ММП γ в плоскости $(X'Y')$, содержащей вектор среднего ММП B_0 (модифицированная солнечно-эклиптическая система координат), тем самым указывая на существование продольных по отношению к B_0 поляризованных колебаний ММП. Это также подтверждает наличие в данное время в межпланетной среде заметного количества магнитозвуковых волн. Рассчитанный коэффициент когерентности для флуктуаций модуля ММП B и концентрации плазмы солнечного ветра n для частоты $\nu \sim 10^{-3}$ Гц равен $\gamma_{Bn} = 0,28$ (рис. 2г). Это означает, что вклад в наблюдаемый спектр ММП быстрых магнитозвуковых волн составляет заметную долю $\approx 30\%$. Поэтому можно полагать, что наблюдаемые флуктуации КЛ высоких энергий в данном событии вызваны модуляцией потока КЛ быстрой магнитозвуковой турбулентностью солнечного ветра, развитой в области взаимодействия потоков с различной скоростью.

Для более полного обоснования этого вывода проведем сравнение теоретического соотношения, описывающего связь спектральных характеристик КЛ и ММП, с результатами эксперимента.

Воздействие магнитозвуковой волны на интенсивность КЛ можно установить на основе уравнения переноса для функции распределения КЛ f [12]:

$$\frac{\partial f}{\partial t} = \nabla_i \kappa_{ij} \nabla_j f - U \nabla f + \frac{\nabla U}{3} p \frac{\partial f}{\partial p},$$

где κ_{ij} — тензор диффузии КЛ, p — импульс частиц КЛ.

В работе [13] на основе этого уравнения получена связь функции распределения КЛ с плоской магнитозвуковой волной малой амплитуды U :

$$\frac{\delta f}{f} = i \frac{\gamma + 2}{3} \frac{\partial U k}{\kappa_{\perp} k_{\perp}^2 + \kappa_{\parallel} k_{\parallel}^2},$$

где $i = \sqrt{-1}$, $\gamma = 2,7$ — показатель спектра КЛ в области энергий $E_p > 1$ ГэВ, k — волновой вектор, κ_{\perp} и κ_{\parallel} — коэффициенты поперечной и продольной диффузии КЛ по отношению к направлению среднего ММП B_0 .

В работе [10] решение уравнения переноса для функции распределения КЛ доведено до установления ожидаемой связи между спектрами флуктуаций КЛ и ММП:

$$\bar{P}_C = \left[\frac{(\gamma + 2)}{3} \frac{C_a (C_w + U \sin \varphi)}{\sqrt{2} \kappa_{\perp} v} \right]^2 \bar{P}_B,$$

здесь \bar{P}_C и \bar{P}_B — спектры мощности флуктуаций КЛ и ММП соответственно, v — частота, φ — угол между направлением среднего ММП B_0 и скоростью солнечного ветра U , C_a — альвеновская скорость, C_w — скорость магнитозвуковой волны, черта сверху указывает на нормировку $\bar{P}_x = P_x / X_0^2$, здесь индексом «0» обозначены средние величины.

С учетом средних значений параметров межпланетной среды (рис. 1) и коэффициента когерентности между флуктуациями модуля ММП B и концентрации плазмы солнечного ветра n $\gamma_{Bn} = 0,28$ (рис. 2г), для частоты $\nu = 1,4 \cdot 10^{-3}$ Гц ожидаемая мощность флуктуаций КЛ, рассчитанная согласно последнему соотношению, составляет $1,63 \cdot 10^{-1}$ Гц⁻¹, в то время как наблюдаемая мощность — $1,04 \cdot 10^{-1}$ Гц⁻¹, что в пределах статистических неопределенностей хорошо согласуется между собой.

Таким образом, проведенный анализ позволяет с большой степенью уверенности утверждать, что в данном событии выделенные флуктуации в спектре КЛ обусловлены модулирующим воздействием на КЛ быстрых магнитозвуковых волн. Оценка размеров соответствующих неоднородностей ММП дает значение $3,2 \cdot 10^{10}$ см, что согласуется с результатами [4].

Анализ флуктуаций КЛ и ММП для остальных пяти событий приводит к подобным результатам. Для событий 5—7 июля, 8—9 июля, 7—9 сентября, 24—26 октября и 28—29 октября 1983 г. в области выделенных частот ожидаемые значения мощности флуктуаций КЛ составляют $1,10 \cdot 10^{-1}$, $2,70 \cdot 10^{-1}$, $1,50 \cdot 10^{-1}$, $0,40 \cdot 10^{-1}$ и $1,40 \cdot 10^{-1}$ Гц⁻¹, наблюдаемые же значения соответственно равны $0,60 \cdot 10^{-1}$, $0,63 \cdot 10^{-1}$, $0,62 \cdot 10^{-1}$, $0,63 \cdot 10^{-1}$ и $0,57 \cdot 10^{-1}$ Гц⁻¹. При этом соответствующие оценки размеров неоднородностей ММП составляют $\sim 3,1 \cdot 10^{10}$, $\sim 6,5 \cdot 10^{10}$, $\sim 4,3 \cdot 10^{10}$, $\sim 4,3 \cdot 10^{10}$ и $\sim 3,6 \cdot 10^{10}$ см.

Закключение

Таким образом, можно сделать заключение, что флуктуации КЛ высоких энергий, наблюдаемые в периоды прохождения орбиты Земли высокоскоростными потоками солнечного ветра, обусловлены модулирующим воздействием на интенсивность КЛ быстрых магнитозвуковых волн с характерными пространственными масштабами $\sim 10^{10}$ — 10^{11} см, развитых в области взаимодействия потоков солнечного ветра с различной скоростью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Козлов В. И. О спектре турбулентности крупномасштабных возмущений солнечного ветра по исследованию флуктуаций космических лучей. Дис. ... канд. физ.-мат. наук. Якутск, 1984. 137 с.
2. Безродных И. П., Кузьмин В. А., Козлов В. И. и др. Динамика частотного спектра флуктуаций межпланетного магнитного поля и космических лучей//Геоматнетизм и аэрономия. 1982. Т. 22. № 6. С. 1016—1018.
3. Безродных И. П., Кузьмин В. А. О флуктуации космических лучей и межпланетного магнитного поля вблизи границы сектора//Бюл. НТИ. Проблемы космофизики и аэрономии. Якутск: ЯФ СО АН СССР. Май 1982. С. 17—19.
4. Кузьмин В. А. Динамический спектр флуктуаций межпланетного магнитного поля и космических лучей на секторной границе//Бюл. НТИ. Проблемы космофизики и аэрономии. Якутск: ЯФ СО АН СССР. Ноябрь 1984. С. 11—13.
5. Кузьмин В. А. Структура секторной границы 5 апреля 1968 года и флуктуации потока космических лучей//Бюл. НТИ. Проблемы космофизики и аэрономии. Якутск: ЯФ СО АН СССР. ноябрь 1984. С. 13—15.
6. Kennel C. F., Sagdeev R. Z. Collisionless shock waves in high β plasmas, 1//J. Geophys. Res. 1967. V. 72. P. 3303—3326.
7. Solar-Geophys. Data. NOAA. Boulder, Colorado. USA. 1985. № 491, Part 2.
8. Бережко Е. Г. Неустойчивость в ударной волне, распространяющейся в газе с космическими лучами//Письма в Астрон. журн. 1986. Т. 12. № 11. С. 842—847.
9. Бережко Е. Г. Генерация МГД-волн в межпланетной плазме потоками солнечных космических лучей//Письма в Астрон. журн. 1990. Т. 16. № 12. С. 1123—1132.
10. Бережко Е. Г., Стародубцев С. А. Природа динамики флуктуаций космических лучей//Изв. АН СССР. Сер. физ. 1988. Т. 52. № 12. С. 2361—2363.
11. Транский И. А., Стародубцев С. А. Поляризациянные параметры крупномасштабной турбулентности солнечного ветра и флуктуации интенсивности космических лучей//Геоматнетизм и аэрономия. 1991. Т. 31. № 1. С. 27—33.
12. Крымский Г. Ф. Короткопериодные вариации космических лучей//Распределение космических лучей и динамика структурных образований в солнечном ветре. Якутск: ЯФ СО АН СССР. 1973. С. 278—290.
13. Berezhenko E. G., Kozlov V. I., Kuzmin A. I., Tugolukov N. N. Cosmic ray intensity micropulsations associated with disturbances of electromagnetic conditions in heliosphere//Proc. 20-th ICRC. Moscow, 1987. V. 4. P. 99—102.

Институт космофизических исследований и аэрономии СО РАН

Институт космических исследований РАН

Поступила в редакцию
14.12.94

После доработки
31.05.95

УДК 551.510.535

© 1996 г. Х. Секо, Э. С. Казимировский

РАСШИРЕНИЕ ДИВЕРГЕНТНОЙ ТЕОРЕМЫ

Приведены аналитические преобразования, расширяющие известное в динамической метеорологии фундаментальное уравнение дивергенции. Оно представлено в трехмерной форме, с включением дивергенции вертикальной скорости, но без учета вязкости.

Введение

В последние годы в центре внимания исследователей атмосферы стоит проблема взаимодействия различных атмосферных слоев. Внутренние законы развития физики атмосферы и потребности практики обусловили интерес метеорологов ко все более высоким слоям атмосферы. В то же время возросла заинтересованность исследователей ионосферы и верхней атмосферы в динамической метеорологии. Этот интерес вызван тем обстоятельством, что важные закономерности в вариациях ионосферных параметров нельзя объяснить, если считать ионосферу изолированной от нижележащих атмосферных слоев. Поэтому современные модели верхней атмосферы и ионосферы рассматривают динамические характеристики нижележащей атмосферы как граничные условия. Особый интерес приобретают агеострофические и вертикальные движения, обеспечивающие динамическую взаимосвязь между нижней и верхней частями атмосферы [1].

Динамический режим атмосферы может описываться фундаментальным уравнением