
КИНЕМАТИКА

И ФИЗИКА

НЕБЕСНЫХ

ТЕЛ

ТОМ 32 № 6 (192) ноябрь — декабрь 2016

НАЦИОНАЛЬНАЯ
АКАДЕМИЯ НАУК
УКРАИНЫ

ОТДЕЛЕНИЕ
ФИЗИКИ
И АСТРОНОМИИ

НАУЧНО-
ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ
ЖУРНАЛ

Основан в январе 1985 г.

● Выходит 6 раз в год

● Киев

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENTS

Космическая физика

Space Physics

Колесник Ю. Л., Ключева А. И., Шахов Б. А., Федоров Ю. И. 3
Влияние высокоскоростных потоков солнечного ветра на интенсивность галактических космических лучей

Kolesnyk Yu. L., Klyuyeva A. I., Shakhov B. A., Fedorov Yu. I.
The effect of solar wind high-speed streams on the galactic cosmic rays intensity

Физика звезд и межзвездной среды

Physics of Stars and Interstellar Medium

Антофеев А. В., Шульга В. М., Зинченко И. И. 20
Биполярный молекулярный поток в источнике IRAS 17233-3606

Antyufeyev O., Shulga V., Zinchenko I.
Bipolar molecular outflow in IRAS 17233-3606

Динамика и физика тел Солнечной системы

Dynamics and Physics of Bodies of the Solar System

Видьмаченко А. П. 30
Сезонные изменения на Юпитере. 2. Влияние облучения планеты Солнцем

Vidmachenko A. P.
Seasonal changes on Jupiter. 2. The effect of Sun irradiation on the planet

- Мороженко А. В., Овсак А. С.* О возможности определения мнимой части комплексного показателя преломления аэрозольных частиц в отдельном высотном облачном слое атмосферы Юпитера 49 *Morozhenko A. V., Ovsak A. S.* On the possibility of determining the value of the imaginary part of the complex refractive index of aerosol particles in a separate altitudinal cloudy layer of jupiter's atmosphere

Физика Солнца

Solar Physics

- Лейко У. М.* Вариации магнитной асимметрии Солнца 56 *Leiko U. M.* Changes of Sun magnetic asymmetry

**Позиционная
и теоретическая астрономия**

**Positional
and Theoretical Astronomy**

- Майгурова Н. В., Мартынов М. В., Крючковский В. Ф.* Результаты астрометрических наблюдений звезд с большими собственными движениями на телескопах НИИ «Николаевская астрономическая обсерватория» 68 *Maigurova N. V., Martynov M. V., Kryuchkoskiy V. F.* Results of the astrometric observations of stars with large proper motions at the Research Institute "Nikolaev Astronomical Observatory" telescopes

Авторский указатель

78 **Index**

УДК 523.165

Ю. Л. Колесник, А. И. Ключева, Б. А. Шахов, Ю. И. Федоров

Главная астрономическая обсерватория Национальной академии наук Украины
ул. Академика Заболотного 27, Киев, 03680
kolesnyk@mao.kiev.ua, shakhov@mao.kiev.ua, fedorov@mao.kiev.ua

Влияние высокоскоростных потоков солнечного ветра на интенсивность галактических космических лучей

Исследовано влияние высокоскоростных рекуррентных потоков солнечного ветра из корональных дыр на интенсивность галактических космических лучей. На основе данных мировой сети нейтронных мониторов было рассмотрено распределение галактических космических лучей для разных фаз солнечного цикла. В рамках неоднородной модели, включающей однородный фон и области высокоскоростных потоков (ВСП), получено решение уравнения переноса и оценено влияние ВСП на пространственное распределение галактических космических лучей. Показано, что теоретические расчеты при разных допущениях относительно транспортного пробега космических лучей за соответствующий период ВСП согласуются с экспериментальными результатами для 2000—2014 гг.

ВПЛИВ ВИСОКОШВИДКІСНИХ ПОТОКІВ СОНЯЧНОГО ВІТРУ НА ІНТЕНСИВНІСТЬ ГАЛАКТИЧНИХ КОСМІЧНИХ ПРОМЕНІВ, Колесник Ю. Л., Ключева А. І., Шахов Б. О., Федоров Ю. І.— Досліджено вплив високошвидкісних рекуррентних потоків сонячного вітру із корональних дір на інтенсивність галактичних космічних променів. На основі даних світової мережі нейтронних моніторів було розглянуто розподіл галактичних космічних променів для різних фаз сонячного циклу. В рамках неоднорідної моделі, що включає однорідний фон та області високошвидкісних потоків (ВШП), отримано розв'язок рівняння переносу і оцінено вплив ВШП на просторовий розподіл галактичних космічних променів. Показано, що теоретичні розрахунки при різних припущеннях стосовно транспортного пробігу космічних променів за відповідний період ВШП узгоджуються з експериментальними результатами за 2000—2014 рр.

THE EFFECT OF SOLAR WIND HIGH-SPEED STREAMS ON THE GALACTIC COSMIC RAYS INTENSITY, by Kolesnyk Yu. L., Klyuyeva A. I., Shakhov B. A., Fedorov Yu. I.— The effect of high-speed recurrent solar wind streams from coronal holes on the intensity of the galactic cosmic rays has been investigated. The distribution of galactic cosmic rays for various solar cycle phases was considered on the basis of data of neutron monitor world network. In the framework of inhomogeneous model which includes homogeneous background and regions of high-speed streams, the transport equation solution has been obtained and the effect of high-speed streams on the galactic cosmic ray spatial distribution has been evaluated. It is shown that theoretical calculations is confirmed with experimental results that have been obtained for 2000—2014 years if to apply assumptions regarding the mean free path of cosmic rays in the corresponding period of high-speed streams.

ВВЕДЕНИЕ

В гелиосфере поток галактических космических лучей (ГКЛ) модулируется в результате взаимодействия ГКЛ с неоднородностями межпланетного магнитного поля и ударными волнами в солнечном ветре (СВ) [7, 8, 12, 18, 21, 26, 27, 29, 32, 33]. Поэтому космические лучи (КЛ) являются важным источником информации о космической погоде в гелиосфере [19, 22, 36]. Большое значение в этом аспекте имеют исследования форбуш-эффектов (ФЭ), параметры которых дают непосредственную информацию об особенностях крупномасштабных возмущений в межпланетной среде [1, 4, 23, 24]. Возмущения межпланетной среды бывают двух типов: спорадические, обусловленные корональными выбросами массы (КВМ), и рекуррентные, связанные с истечением высокоскоростных потоков (ВСП) плазмы из корональных дыр (КД) [18, 20, 23, 28, 40, 45, 54, 55, 59]. В работе на большом статистическом материале за 2000—2014 гг. исследуется связь корональных дыр с ВСП солнечного ветра на орбите Земли и особенности модуляции ГКЛ этими потоками. На основе теоретических моделей распространения ГКЛ в гелиосфере, которые учитывают наличие ВСП СВ, предпринята попытка объяснить эти экспериментальные данные.

РЕКУРРЕНТНЫЕ ВЫСОКОСКОРОСТНЫЕ ПОТОКИ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА НА ОРБИТЕ ЗЕМЛИ

Исследования ВСП СВ проводились на основе различных подходов и методик [10, 11], в результате чего составлены специальные каталоги [10, 37—39, 41, 42, 58], включающие основные параметры ВСП, такие как дата вхождения Земли в ВСП, длительность жизни потока на орбите Земли, его тип в зависимости от источника (корональная дыра

или спорадическое возмущение), скорость спокойного СВ (скорость до вхождения в поток), максимальная скорость СВ в потоке и производные этих величин.

Для составления выборки ВСП рекуррентного типа мы объединили данные всех названных каталогов и провели их анализ. В процессе обработки каталогов каждое событие дополнительно подвергалось проверке по трем критериям: 1) обязательное наличие корональной дыры, прохождение которой по диску Солнца могло быть источником ВСП на орбите Земли в указанный в каталоге период; 2) отсутствие в межпланетной среде крупномасштабных возмущений спорадического типа: ударных волн, корональных выбросов массы, магнитных облаков и т. п. в течение всего периода жизни ВСП на орбите Земли и минимум за два дня до и после его регистрации; 3) типичное для рекуррентных ВСП поведение основных параметров: повышенное значение ионной температуры, повышенное значение скорости СВ (> 400 км/с), пониженная концентрация, увеличение напряженности магнитного поля с последующим его понижением. Все события, не соответствующие данным критериям, исключались из дальнейшего анализа.

В результате обработки данных каталогов сформирован список, включающий более 400 ВСП, источниками которых с большой вероятностью являлись корональные дыры. На следующем этапе работы нами рассмотрены особенности модуляции ГКЛ выделенными рекуррентными потоками высокоскоростного СВ.

МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ

Интенсивность космических лучей исследовалась на основе данных мировой сети станций КЛ, включающей 14 высокоширотных, 24 среднеширотных и 6 низкоширотных нейтронных мониторов (НМ). Анализ выполнен с применением метода глобальной съемки, позволяющего по данным наземных наблюдений исследовать плотность (изотропную составляющую потока КЛ), векторную анизотропию и спектр ГКЛ за пределами атмосферы и магнитосферы Земли [12, 13, 17, 43].

Метод глобальной съемки представляет собой сферический анализ, в котором используется разложение вариаций КЛ по сферическим гармоникам. В применении к данным НМ метод глобальной съемки объединяет в себе три метода: метод функций связи, траекторных расчетов движения частиц в магнитном поле Земли и метод сферического анализа.

Функции связи позволяют осуществить переход от вариаций КЛ в точке наблюдения к ожидаемым вариациям на границе атмосферы, т. е. позволяют учесть взаимодействие первичных и вторичных частиц

* См. также сайты http://www.spacescience.ro/new1/HSS_Catalogue.html,
http://www.spacescience.ro/new1/Pagini_finale/GS_HSS_Catalogue.htm,
http://www.solen.info/solar/coronal_holes.html

различных энергий с веществом атмосферы. Метод траекторных расчетов частиц позволяет учесть влияние магнитосферы на первичные КЛ через приемные коэффициенты, в которые также включен учет влияния атмосферы, что делает возможным переход от наблюдаемых вариаций вторичной компоненты КЛ к вариациям внеземного происхождения. Метод сферического анализа позволяет выделить существенные для конкретной задачи сферические гармоники, например изотропную и анизотропную вариации интенсивности КЛ за пределами магнитосферы в произвольные интервалы времени [2].

Данные конкретного нейтронного монитора содержат информацию, которая зависит от точки наблюдения и ориентации асимптотического конуса приема данной станции КЛ. В связи с этим форбуш-эффекты на отдельных станциях будут выглядеть по-разному, что существенно усложняет изучение и интерпретацию данных. Метод глобальной съемки имеет существенное преимущество в сравнении с данными отдельных нейтронных мониторов, так как позволяет находить глобальные характеристики КЛ за пределами магнитосферы независимо от положения точки наблюдения на Земле.

РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА ФОРБУШ-ПОНИЖЕНИЙ РЕКУРРЕНТНОГО ТИПА

В данной работе изучение модуляции ГКЛ высокоскоростными потоками СВ от КД проводилось с использованием среднечасовых данных вариаций плотности КЛ, полученных методом глобальной съемки. Прохождение ВСП СВ приводит к понижению интенсивности ГКЛ, причем временной профиль их интенсивности в данной точке пространства может иметь прямоугольную или трапециoidalную форму. Для каждого события из сформированной выборки ВСП строился график зависимости интенсивности потока ГКЛ от времени и изучался его профиль.

Несмотря на тщательный отбор рекуррентных ВСП на предыдущем этапе работы, для большей надежности выделения форбуш-эффектов, вызванных прохождением ВСП из корональных дыр, мы применили дополнительные критерии сепарации и при анализе самих форбуш-понижений. Так, если регистрировался предвестник форбуш-понижения, если событие характеризовалось затянутой фазой восстановления или длительной нисходящей фазой, если амплитуда понижения превышала 5 %, мы исключали такие события из дальнейшего рассмотрения, так как зачастую подобные особенности формы профиля ФП свидетельствуют о смешанной или спорадической природе источника модуляции. В результате оказалось, что многие ВСП очень слабо модулируют поток ГКЛ и не вызывают заметных (с амплитудой понижения интенсивности КЛ более 0.5 %) форбуш-понижений.

В итоге было отобрано 86 форбуш-понижений, для которых прослеживалась надежная связь с потоками быстрого солнечного ветра от КД. Приблизительно четвертая часть выбранных ФЭ имела профиль близкий к прямоугольной форме. Были отмечены следующие особенности таких ФЭ: а) величина понижений интенсивности КЛ варьировала в пределах 0.8—2.5 %, в то время как амплитуда форбуш-эффектов от спорадических источников обычно составляет 5—15 %; б) длительность ФЭ (от начала спада до полного восстановления интенсивности) чаще всего составляла 4-5 сут, что соответствует длительности жизни ВСП СВ в окрестностях Земли, а это, в свою очередь, согласуется с временем прохождения корональной дыры через центральный меридиан Солнца [16].

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБЪЯСНЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Для теоретического объяснения экспериментальных данных используем стационарную модель распространения ГКЛ в гелиосфере. Такая модель была детально рассмотрена в работах [34, 51]. Для нахождения концентрации ГКЛ в околоземном пространстве во время рекуррентного возмущения межпланетной среды эту модель можно использовать следующим образом. Будем считать, что гелиосфера во время выброса ВСП плазмы представляет собой многослойную среду, состоящую из возмущенной и невозмущенной области. Возмущенная область, в которую попадает Земля, будет возникать в результате выброса ВСП плазмы, ограниченной конической боковой поверхностью, искривленной вследствие вращения Солнца. Скорость плазмы внутри данной области характеризуется значением u_s (см. рис. 1). Невозмущенная область — это вся остальная часть гелиосферы, в которой радиальная скорость солнечного ветра равна u_0 . Отметим, что рассеяние частиц в этих областях происходит различным образом и характеризуется коэффициентами диффузии: D_s для возмущенной области и D_0 для невозмущенной. В межзвездной среде скорость солнечного ветра предполагается равной нулю, а рассеяние частиц становится слабым, что соответствует современным данным. Концентрация ГКЛ в межзвездной среде ($r \rightarrow \infty$) была выбрана в следующем виде [9]:

$$N_r(r) = N_\infty (1 - \frac{r_0}{r})^{-(1+\alpha)/2}, \quad (1)$$

где $N(r, p, t) = \int f(r, \mathbf{p}, t) d^3p$ — концентрация частиц с данным значением импульса, а интегрирование производится по углам вектора скорости частицы, $p/(m_0 c)$ — нормированный импульс частицы, m_0 — масса покоя частицы, c — скорость света в вакууме, α — спектральный индекс. В работе [34] аналитическим путем было получено распределение ГКЛ в многослойной среде. В частности, для возмущенной области формула для концентрации частиц высоких энергий ($\alpha > 10$), нормированной к спектру (1), будет иметь вид

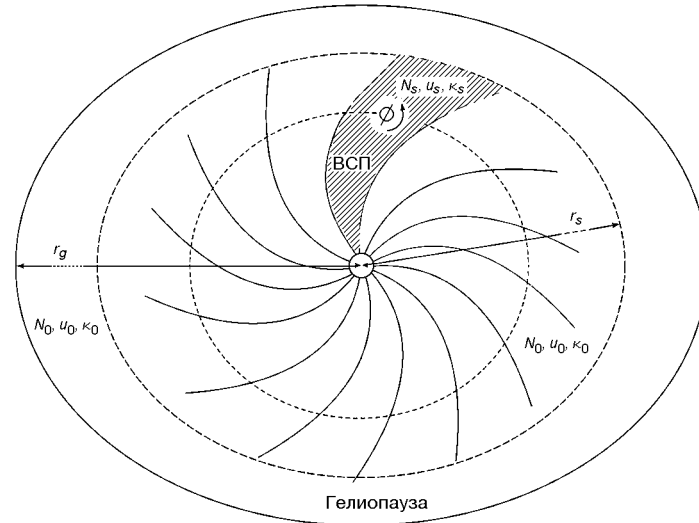


Рис. 1. Модуляция галактических космических лучей в гелиосфере при наличии высокоскоростного потока плазмы

$$N_s(r) = A_1(s) F(2s/3, 2; x_s r/r_s), \quad (2)$$

где $x_s = u_s r_s / v$ — параметр модуляции ГКЛ для возмущенной области, r_s — гелиоцентрическое расстояние до границы ВСП СВ, $F(a, b; x)$ — первое линейно независимое решение вырожденного гипергеометрического уравнения, $s = 2$, $A_1(s)$ и другие коэффициенты для его нахождения были определены из выражений

$$A_1(s) = \frac{\{F(2s/3, 2; x_0) [K(2s/3, 2; x_0) 2x_0 (2s/3 - 1, 3; x_0)] (2s/3, 2; x_0) [x_0 F(2s/3 - 1, 3; x_0) - K F(2s/3, 2; x_0)]\}}{[Z F(2s/3, 2; x_s)]},$$

$$K = \frac{x_s r_s / v}{F(2s/3, 2; x_s)} [F(2s/3 - 1, 3; x_s) - F(2s/3, 2; x_s)] x_0,$$

$$Z = \frac{[(2s/3, 2; x_0) K 2x_0 (2s/3 - 1, 3; x_0)] T}{[x_0 F(2s/3 - 1, 3; x_0) - K F(2s/3, 2; x_0)]} \quad (3)$$

$$x_0 = \frac{sr_g}{3r_s} \left(1 - \frac{2}{3} s, 2; x_0 \frac{r_g}{r_s} \right) \quad x_0 = \frac{2sr_g}{3r_s} \left(\frac{2}{3} s - 1, 3; x_0 \frac{r_g}{r_s} \right),$$

$$T = F \left(\frac{2}{3} s, 2; x_0 \frac{r_g}{r_s} \right) \left(1 - x_0 \frac{sr_g}{3r_s} \right) \quad x_0 = \frac{sr_g}{3r_s} F \left(\frac{2}{3} s - 1, 3; x_0 \frac{r_g}{r_s} \right).$$

Здесь $x_0 = u_0 r_s / v$ — параметр модуляции КЛ для невозмущенной области, r_g — расстояние от Солнца до гелиопаузы, $v = v_{in}$, κ_{in} — коэффициент диффузии в межзвездной среде; $F(a, b; x)$ — второе линейно независимое решение вырожденного гипергеометрического уравнения [3].

Для нахождения концентрации ГКЛ в околоземном пространстве в отсутствие возмущенной межпланетной среды (фоновое значение концентрации ГКЛ) можно использовать более простую модель распространения ГКЛ в гелиосфере и межзвездной среде, которая была детально рассмотрена в работе [35]. Здесь гелиосфера рассматривается как сферически-симметричная среда, которая от межзвездного пространства ограничивается гелиопаузой. В этой области радиальная скорость солнечного ветра характеризуется постоянным значением u_0 , а рассеяние частиц — коэффициентом диффузии D_0 . Рассеяние ГКЛ в межзвездной среде происходит на неподвижных магнитных неоднородностях, является более слабым, чем в гелиосфере, и характеризуется коэффициентом диффузии D_{in} . Спектр ГКЛ на бесконечности также описывается выражением (1). В работе [35] была получена формула для концентрации частиц высоких энергий, нормированной к спектру (1), при модуляции их в гелиосфере:

$$N_0(r) = \frac{F(2s/3, 2; x_g r/r_g)}{1 - \frac{sx_g}{3} F(2s/3, 2; x_g) - \frac{sx_g}{3} F(2s/3 - 1, 3; x_g)}, \quad (4)$$

где $x_g = u_0 r_g / D_0$ — параметр модуляции КЛ для гелиосферы.

Таким образом, форбуш-понижение КЛ может характеризоваться величиной M , которая будет определяться для теоретических вычислений как $M = [(N_0 - N_s)/N_0] 100\%$, а из данных эксперимента — как $M = |I(\%)|$, где $I(\%)$ — изменение интенсивности КЛ, регистрируемой нейтронными мониторами после прохождения ВСП СВ. Из (2) и (4) видно, что при нахождении N_0 и N_s необходимо знать не только значения скорости СВ, которые могут быть получены экспериментальным путем, но и коэффициенты диффузии КЛ как для невозмущенной области (D_0), так и для области ВСП (D_s). Для их нахождения воспользуемся формулой, которая приведена в работе [48]:

$$D_{0,\parallel} = \frac{B_0}{B} \frac{P}{P_0} \frac{a}{1 - (P/P_0)^c} \frac{(P_k/P_0)^c}{(P_k/P_0)^c} \frac{b}{c}, \quad (5)$$

где v/c , т. е. отношение скорости частицы к скорости света, B — напряженность магнитного поля в данной точке пространства, $B_0 = 1$ нТл, P — жесткость частицы, $P_0 = 1$ ГВ, a — индекс, который изменяется со временем, $c = 3.0$, $b = 1.95$. Отметим, что $D_{0,\parallel}$, a , P_k для каждого года имеют свои значения. В частности, значения для a , P_k приведены в работе [48], в то время как $D_{0,\parallel}$ могут быть найдены если использовать значения длин пробега частицы на определенной энергии (100 МэВ), приведенные в работе [48]. Так, для 2006 г. $D_{0,\parallel} = 1.105 \cdot 10^{24} \text{ см}^2 \text{ с}^{-1}$ и для 2009 г. $D_{0,\parallel} = 1.358 \cdot 10^{23} \text{ см}^2 \text{ с}^{-1}$.

На рис. 2 показана зависимость длины пробега частицы от ее жесткости для четырех разных случаев до наступления форбуш-пониже-

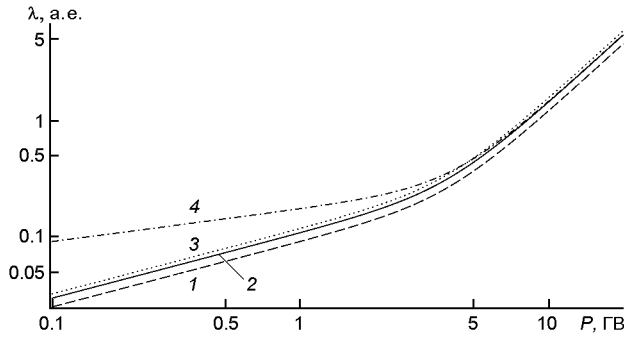


Рис. 2. Зависимость длины пробега частицы от ее жесткости P для разных дат до наступления форбуш-понижения: 1 — 06.08.05, 2 — 05.06.06, 3 — 09.11.06, 4 — 13.11.10

Данные для ВСП потоков

Дата	Экспериментальные значения					Теория		
	u_0 , км/с	u_s , км/с	B_f , нТл	B_s , нТл	M , %	$N_0, 10^{19} \text{ м}^2 \text{ с}^{-1}$	$N_s, 10^{19} \text{ м}^2 \text{ с}^{-1}$	M , %
06.08.2005	370	714	8.1	6.0	2.5	1.8	2.43	1.8
06.05.2006	387	636	6.81	6.05	1.1	2.14	2.41	1.7
09.11.2006	349	633	2.6	4.1	2.4	5.61	3.56	3.0
13.11.2010	340	637	5.2	5.0	1.6	2.18	2.27	2.6

ния. Таким образом, если для каждого ВСП использовать значения магнитного поля в околоземном пространстве как до наступления форбуш-понижения (B_f), так и после (B_s), то для частиц с жесткостью $P = 10$ ГВ можно найти соответствующие коэффициенты диффузии. После этого, задав следующие значения параметров для гелиосферы и межзвездного пространства: $r_g = 100$ а. е., $r_s = 10$ а. е., $\beta = 2.7$, $\alpha = 0.001$, мы получили N_0 , N_s и $M(\%)$ для каждого случая ВСП. Эти данные приведены в таблице.

На рис. 3 показаны интенсивности КЛ, полученные экспериментальным путем во время форбуш-понижений.

Оценить величину вариации интенсивности ГКЛ, обусловленную прохождением высокоскоростного потока солнечного ветра, можно и другим способом. Для этого используем аналитические решения уравнения переноса КЛ, которые были получены в приближении постоянного коэффициента диффузии частиц [5, 15, 30, 50]. Вначале рассмотрим пространственное распределение КЛ в невозмущенной сферически-симметричной гелиосфере, в которой отсутствуют высокоскоростные потоки. Уравнение переноса, описывающее распространение КЛ в гелиосферных магнитных полях, имеет следующий вид [6, 31, 44]:

$$\frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} \left(r^2 D \frac{dN}{dr} \right) - u \frac{dN}{dr} - \frac{2u_1}{3r} p \frac{dN}{dp} = 0. \quad (6)$$

При энергиях частиц больше или порядка 10 ГэВ спектр ГКЛ оказывается степенным: $N \propto p^{-\gamma}$ с показателем спектра $\gamma = 4.7$ [14, 49, 57]. Предположим, что КЛ на границе области модуляции $N_0(p)$ описыва-

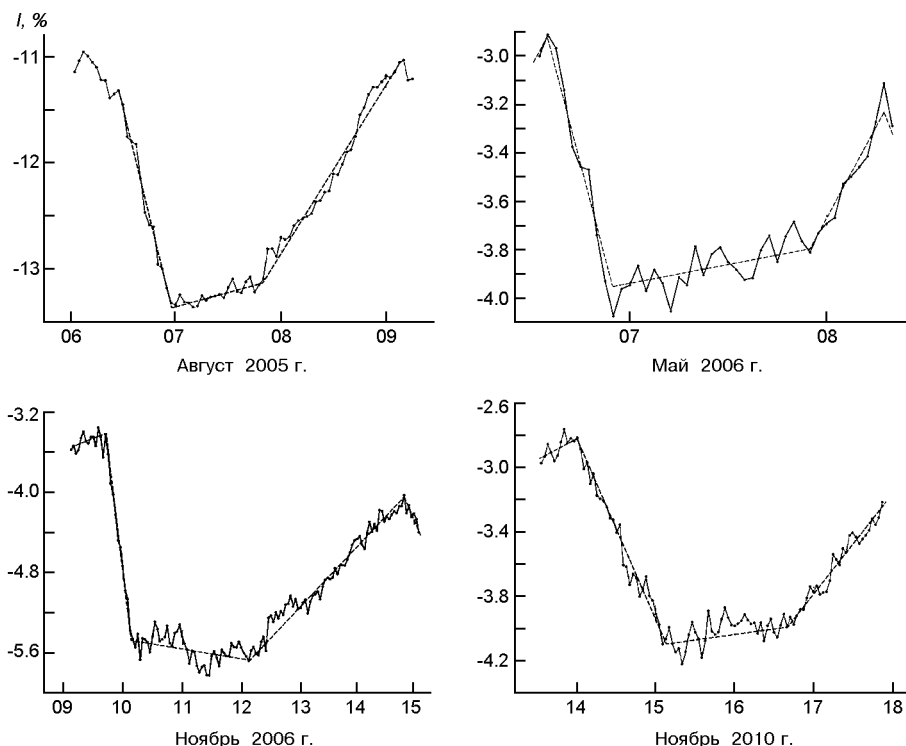


Рис. 3. Зависимость интенсивности КЛ от времени во время форбуш-понижений

ется степенной функцией импульса как при больших, так и при малых энергиях:

$$N_0(\epsilon) = N_1 (1 - \epsilon)^{-1} N_1 (\epsilon^{-1}), \quad (7)$$

где N_1 — постоянная величина, а $\chi(x)$ — единичная функция Хевисайда. Согласно (7) $N_0(\epsilon) \propto \epsilon^{-4.7}$ при $p > mc$. В случае малых энергий ($\epsilon < 1$) немодулированный спектр ГКЛ также степенной, но с другим показателем степени α_1 . Отметим, что для нерелятивистских КЛ показатель степени $\alpha_1 = 1.5$ согласуется с энергетическим распределением ГКЛ, измеренным космическим аппаратом «Вояджер-1» в 2012 г. [47, 56, 57].

Приведем решение уравнения переноса (6), соответствующее энергетическому распределению КЛ (7), заданному на границе области модуляции (на сфере радиуса r_0) [30]:

$$N(\epsilon, r) = N_1 (1 - \epsilon)^{-1} \frac{F(2 - \alpha_1/3, 2; -\alpha_1)}{F(2 - \alpha_1/3, 2; -\alpha_1)} \left(\frac{r}{r_0} \right)^{\alpha_1} \frac{F(s_n, 2; -\alpha_1)}{s_n^{n-1} (s_n - 1) (s_n - s) F(s_n, 2; -\alpha_1)}$$

$$N_1 (\epsilon^{-1}) \frac{F(2 - \alpha_1/3, 2; -\alpha_1)}{F(2 - \alpha_1/3, 2; -\alpha_1)}, \quad (8)$$

где r/r_0 — безразмерная координата, $u_1 r_0 / u_0 r_1$ — параметр модуляции КЛ. Величины s_n , которые содержатся во втором слагаемом выражения (8), являются корнями уравнения $F(s, 2; \nu_1) = 0$. Это уравнение имеет только отрицательные корни. Производные по s в знаменателе второго слагаемого формулы (8) берутся в точке s_n . Пространственно-энергетическое распределение частиц высоких энергий ($\nu > 1$) описывается последним слагаемым (8).

Таким образом, спектр КЛ высоких энергий внутри области модуляции оказывается степенным с тем же показателем спектра ν , что и спектр на границе области модуляции (при $\nu = 1$) (7). Спектр нерелятивистских КЛ ($\nu \ll 1$) согласно соотношению (8) приближенно описывается степенной функцией импульса с показателем спектра ν_1 . Следовательно, пространственно-энергетическое распределение КЛ в невозмущенной гелиосфере описывается соотношением (8).

Теперь рассмотрим пространственное распределение ГКЛ при наличии высокоскоростного потока СВ. Предположим, что область модуляции ГКЛ состоит из двух областей. Во внутренней области ($r < r_1$) скорость СВ радиальна и по величине равна u , а рассеивательные свойства межпланетной среды характеризуются коэффициентом диффузии КЛ D_1 .

Таким образом, скорость u высокоскоростного потока, распространяющегося во внутренней области гелиосферы, превышает скорость u_1 невозмущенного СВ во внешней гелиосфере. Диффузия КЛ в невозмущенном СВ описывается коэффициентом диффузии D_2 , а параметр модуляции КЛ во внешней области модуляции имеет вид $\nu_1 = ur_0 / (u_1 r_1)$. При нахождении аналитического решения уравнения переноса удобно использовать преобразование Меллина [6, 15, 30, 34]. В результате можно получить выражения для концентрации частиц высоких энергий как во внутренней области гелиосферы, так и во внешней. Так, для внутренней области концентрация КЛ имеет вид

$$N(r, \nu) = N_1 \frac{G(\nu)}{H(\nu)} F(2\nu/3, 2; \nu_1) \quad (9)$$

где величины $G(\nu)$ и $H(\nu)$ представляют собой функции

$$G(s) = 2^{-3} \nu^{-2} \nu_1^{-1},$$

$$H(s) = \nu_1^{-1} (\nu_1^{-4} \nu_1^{-3} \nu_1^{-2} \nu_1^{-5} \nu_1^{-2}) (\nu_1^{-5} \nu_1^{-1} \nu_1^{-3} \nu_1^{-2}) [\nu_1^{-2} (1 - \nu_1^{-1})]_1,$$

$$\nu_1^{-1} F(2s/3, 2; \nu_1); \nu_1^{-2} F(2s/3 - 1, 3; \nu_1); \nu_1^{-3} F(2s/3, 2; \nu_1^{-1});$$

$$\nu_1^{-4} F(2s/3 - 1, 3; \nu_1^{-1}); \nu_1^{-5} F(2s/3, 2; \nu_1);$$

$$\nu_1^{-1} (2s/3, 2; \nu_1^{-1}); \nu_1^{-2} (2s/3 - 1, 3; \nu_1^{-1}); \nu_1^{-3} (2s/3, 2; \nu_1),$$

вычисленные в точке $s = \nu$.

Для внешней области концентрация частиц имеет вид

$$N(r, \nu)$$

$$N_1(\rho) = \frac{L(\rho)F(2\rho/3, 2; \rho)}{H(\rho)} + \frac{L(s_n)F(s_n, 2; \rho)}{(s_n - \rho)H(s_n)/s} + \frac{M(\rho)F(2\rho/3, 2; \rho)}{H(\rho)}, \quad (10)$$

где величины L и M представляют собой функции: $L(s) = 2\rho^{-1/2} + \rho^{-1}[\rho^{-2}(1-\rho)^{-1}]$, $M(s) = \rho^{-1/4}\rho^{-3}[\rho^{-2}(1-\rho)^{-1}]$. Концентрация ГКЛ высоких энергий описывается последним слагаемым (10).

Отметим, что концентрации ГКЛ (9) и (10) для частиц с импульсом $p > mc$ представляют собой степенную функцию импульса частицы с показателем степени немодулированного спектра КЛ. Пространственное распределение частиц определяется параметрами модуляции ρ и скачком скорости среды на границе ВСП солнечного ветра. В этом случае параметр модуляции КЛ в этой области равен ur_0/ρ . Во внешней области ($r_1 < r < r_0$, или $\rho < 1$, где $\rho = r_1/r_0$), скорость СВ радиальна и равна u_1 по величине, причем $u_1 = u/\rho$.

На рис. 4 приведена зависимость концентрации от безразмерной гелиоцентрической координаты ρ . Концентрация частиц нормирована на соответствующее значение на границе области модуляции ($r = r_0$) (7). Пунктирная кривая иллюстрирует пространственное распределение концентрации КЛ в невозмущенной гелиосфере. Сплошной кривой представлена зависимость концентрации КЛ $N(\rho)$ (9), (10) от безразмерной координаты ρ . Расчеты проведены при следующих значениях параметров: $\rho_1 = 0.1$, $\rho_2 = 0.18$, $\rho_3 = 1.8$, $\rho_4 = 3$. Отметим, что в пространственной области ρ_1 концентрация частиц в ВСП оказывается меньше, чем концентрация КЛ в невозмущенном СВ. Если ρ_1 , то различия между величинами концентрации КЛ в невозмущенной гелиосфере и СВ, содержащем ВСП, становятся малыми, а пунктирная и сплошная кривая практически сливаются.

Для расчета пространственного распределения ГКЛ в невозмущенной гелиосфере воспользуемся соотношением для концентрации частиц (8). Поскольку средняя энергия детектируемых частиц составляет величину порядка 10 ГэВ, то необходимо учитывать только последнее слагаемое формулы (8). Для оценки значения параметра мо-

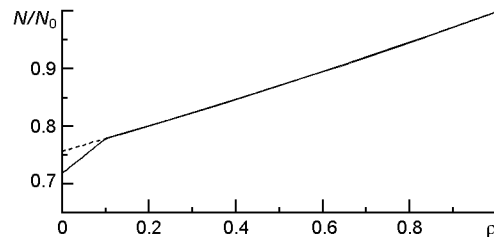


Рис. 4. Зависимость относительной концентрации КЛ от безразмерного гелиоцентрического расстояния

дуляции β_1 (событие от 09.11.2006, см. таблицу), воспользуемся значением пробега частиц $\beta = 3.77$ а. е. при жесткости $R = 10$ ГВ, соответствующего уровню солнечной активности 2006 г., приведенному в работе [48]. При использовании коэффициента диффузии КЛ $\beta/3$ и значения 349 км/с скорости СВ для интересующего нас периода (вне ВСП) для предполагаемого радиуса области модуляции КЛ $r_0 = 100$ а. е. получаем параметр модуляции КЛ в невозмущенной среде: $\beta_1 = 0.093$.

При прохождении ВСП 09.11.2006 г. скорость СВ увеличилась до значения $u = 633$ км/с, следовательно $\beta = 1.814$. Магнитное поле на орбите Земли увеличилось при прохождении ВСП от 2.6 нТл до 4.1 нТл. Для оценки коэффициента диффузии КЛ в ВСП СВ используем формулу (5) следующим образом:

$$\frac{B_1}{B} = \beta_1,$$

где B, B_1 — индукция межпланетного магнитного поля в ВСП и невозмущенном СВ соответственно, β_1 — коэффициент диффузии в невозмущенном СВ. Таким образом, получаем значение параметра модуляции КЛ $\beta_1 = 0.265$, соответствующее ВСП СВ.

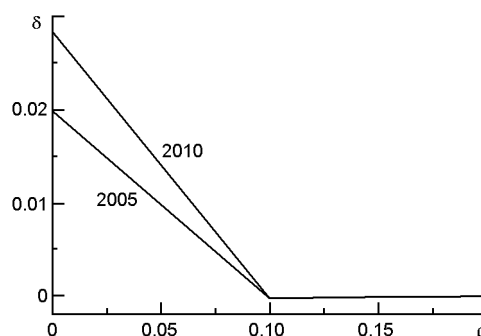
Оценим относительное понижение интенсивности КЛ при прохождении ВСП СВ. Обозначим концентрацию КЛ в данной точке пространства в невозмущенной гелиосфере величиной $g_0(\beta, R)$, а величиной $g(\beta, R)$ — концентрацию КЛ в СВ при наличии в нем ВСП, которая описывается соотношениями (9), (10). Введем следующую функцию, которая описывает относительное изменение концентрации КЛ при прохождении ВСП СВ: $1 - g(\beta, R)/g_0(\beta, R)$. Были использованы следующие значения параметров: $\beta = 4.7$, $\beta_1 = 0.1$, $\beta_1 = 0.093$, $\beta_1 = 0.265$, $\beta = 1.814$. На орбите Земли, т. е. при $\beta = 0.01$ мы получаем $(0.01) = 0.0238$. Таким образом, после прохождения ВСП в 2006 г. понижение интенсивности КЛ с жесткостью $R = 10$ ГВ составило 2.4 %.

Рассмотрим понижение интенсивности ГКЛ, обусловленное прохождением ВСП 2010 г. (событие от 13.11.2010, см. таблицу). Скорость невозмущенного ветра составила $u_1 = 340$ км/с. Используя значение пробега $\beta = 1.93$ а. е. [48], получим параметр модуляции КЛ в невозмущенном СВ: $\beta_1 = 0.233$. Скорость среды в ВСП $u = 637$ км/с, следовательно $\beta = 1.87$. Используя значения индукции межпланетного поля на орбите Земли в невозмущенном СВ и в ВСП, получим параметр модуляции в возмущенном СВ: $\beta_1 = 0.420$. Для ВСП 2010 г. относительное понижение интенсивности частиц жесткости $R = 10$ ГВ составило 2.6 % ($\beta_1 = 0.026$).

В результате аналогичных расчетов для ВСП события от 06.05.2006 (см. таблицу) получено значение $\beta_1 = 0.0173$, т. е. относительное понижение интенсивности ГКЛ составило 1.7 %.

Проводя аналогичные расчеты для ВСП 2005 г. (событие от 06.08.2005), получим: $\beta = 1.93$, $\beta_1 = 0.306$, $\beta_1 = 0.437$.

Рис. 5. Зависимость относительного понижения интенсивности КЛ от гелиоцентрической координаты в 2005 и 2010 гг.



Таким образом, относительное понижение интенсивности ГКЛ, обусловленное прохождением ВСП СВ 2005 г., составляет величину 1.8 % ($\delta = 0.0178$).

На рис. 5 приведена зависимость величины (δ) от гелиоцентрического расстояния для случаев, соответствующих прохождению высокоскоростных потоков СВ 2005 и 2010 гг. Видно, что в области ВСП относительная вариация интенсивности ГКЛ положительна. Следовательно, интенсивность КЛ в высокоскоростном потоке оказывается пониженной относительно интенсивности частиц в невозмущенной гелиосфере. Причем чем дальше от границы ВСП, тем больше величина δ и тем ниже интенсивность ГКЛ. Величина δ изменяет знак на границе ВСП (в точке $\rho = 0.1$). Однако абсолютная величина ($\delta > 0.1$) оказывается небольшой и составляет несколько сотых долей процента.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ данных мировой сети нейтронных мониторов позволил исследовать процесс модуляции ГКЛ высокоскоростными потоками СВ из корональных дыр. Показано, что величина уменьшения интенсивности КЛ при прохождении ВСП определяется следующими характеристиками плазмы: гидродинамической скоростью потока, характерным размером потока, рассеивательными свойствами среды, определяющими транспортный пробег частиц высокой энергии. Исследованы характеристики рекуррентных понижений интенсивности КЛ, обусловленных потоками быстрого СВ от корональных дыр: длительность и амплитуда понижения, форма временного профиля интенсивности ГКЛ. Показано, что амплитуда исследуемых понижений составляет 0.8—2.5 %, а их длительность — 4-5 сут, что согласуется с длительностью существования ВСП СВ в околоземном космическом пространстве.

На основании решения уравнения переноса, описывающего распространение КЛ в гелиосферных магнитных полях, проведена оценка влияния ВСП на пространственное распределение ГКЛ. Расчеты проведены как с учетом влияния рассеивающих свойств межзвездной

среды на модуляцию ГКЛ, так и без учета такого влияния. В одной из рассмотренных задач немодулированный спектр ГКЛ задавался на гелиоцентрическом расстоянии, значительно превышающем размеры гелиосферы, а в другой — на гелиопаузе. Расчеты показали, что оба подхода приводят к близким результатам, если транспортный пробег КЛ в межзвездной среде значительно превышает пробег частиц внутри гелиосферы. Сделаны оценки понижения интенсивности ГКЛ на орбите Земли во время прохождения ВСП и проведено сравнение с наблюдательными данными. Приведенные в таблице результаты показывают соответствие теоретических оценок и данных, полученных на мировой сети нейтронных мониторов.

Авторский коллектив выражает благодарность сотрудникам отдела космических лучей ИЗМИРАН за предоставленные среднечасовые данные вариаций плотности КЛ, обработанные методом глобальной съемки, а также рецензенту за ряд ценных замечаний.

1. *Абунин А. А.* Связь величины форбуш-эффекта с внутренними и внешними параметрами // Баксанская молодежная школа экспериментальной и теоретической физики: Тр. 10-й БМШ ЭТФ.—2010.—Т. 2.—С. 74—81.
2. *Абунин А. А.* Характеристики форбуш-эффектов и их связь с солнечными, межпланетными и геомагнитными возмущениями: Дис. ... канд. физ.-мат. наук. — М.: ИЗМИРАН, 2014.—155 с.—Машинопись.
3. *Бейтман Г. Эрдейи А.* Высшие трансцендентные функции. — М.: Наука, 1965.—294 с.
4. *Белов А. В., Ерошенко Е. А., Оленева В. А., Струминский А. Б., Янке В. Г.* Чем обусловлены и с чем связаны форбуш-эффекты? // Изв. РАН. Сер. физ.—2001.—**65**, № 3.—С. 373—376.
5. *Долгинов А. З., Топтыгин И. Н.* Многократное рассеяние частиц в магнитном поле со случайными неоднородностями // ЖЭТФ.—1966.—**51**, вып. 6.— С. 1771—1783.
6. *Долгинов А. З., Топтыгин И. Н.* О диффузии космических лучей в межпланетной среде // Геомагнетизм и аэрномия.—1967.—**7**, № 6.—С. 967—973.
7. *Дорман Л. И.* Вариации космических лучей. — М.: Гостехтеориздат, 1957.—492 с.
8. *Дорман Л. И.* Вариации космических лучей и исследование космоса. — М.: Изд-во АН СССР, 1963.—1027 с.
9. *Дорман Л. И., Кац М. Е., Шахов Б. А.* О связи между различными формами уравнения диффузии космических лучей // Геомагнетизм и аэрномия.—1976.—**16**, № 5.—С. 919—920.
10. *Ермолаев Ю. И., Николаева Н. С., Лодкина И. Г.* Каталог крупномасштабных явлений солнечного ветра для периода 1976—2000 гг. // Космич. исслед.—2009.—**47**, № 2.—С. 99—113.
11. *Житник И. А., Жигалкин Р. К., Игнатьев А. П. и др.* // Исследование солнечных образований на основе комплексных наблюдений с Земли и на спутнике КОРОНАС-Ф. IV. Корональные дыры, открытые магнитные трубки и их связь с высокоскоростными потоками солнечного ветра // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории.—2005.—**101**.— С. 128—145.
12. *Крымский Г. Ф., Кузьмин А. И., Кривошапкин П. А. и др.* Космические лучи и солнечный ветер. — Новосибирск: Наука, 1981. — 224с.
13. *Крымский Г. Ф., Кузьмин А. И., Чирков Н. Р. и др.* Распределение космических

- лучей и приемные векторы детекторов. I // Геомагнетизм и аэронавигация.—1966.—**6**, № 8.—С. 991—996.
14. *Топтыгин И. Н.* Космические лучи в межпланетных магнитных полях. — М. Наука, 1983.—302 с.
 15. *Федоров Ю. И.* Модуляция интенсивности галактических космических лучей в турбулентной гелиосфере // Кинематика и физика небес. тел.—2015.—**31**, № 3.—С. 3—22.
 16. *Хундхаузен А.* Расширение короны и солнечный ветер. — М.: Мир, 1976.—302 с.
 17. *Altukhov A. M., Krymsky G. F., Kuzmin A. I.* The method of “global survey” for investigating cosmic ray modulation // Acta Phys.—1970.—Suppl. to Vol. 29 (Muons and Neutrinos, Techniques).—P. 457.—(Proceedings of the 11th International Conference on Cosmic Rays, held in Budapest, 25 August — 4 September, 1969 / Ed. A. Somogyi, Vol. 4).
 18. *Badraddin.* Cosmic ray modulation: effects of high-speed solar wind streams // Astrophys. and Space Sci.—1997.—**246**.—P. 171—191.
 19. *Badraddin.* Transient perturbations and their effects in the heliosphere, the geomagnetosphere and the Earth’s atmosphere: space weather perspective // J. Astrophys. and Astron.—2006.—**27**, N 2.—P. 209—217.
 20. *Badraddin, Yadav R. S., Yadav N. R.* Influence of magnetic clouds on cosmic ray intensity variation // Solar Phys.—1986.—**105**.—P. 413—428.
 21. *Belov A. V.* Large-scale modulation: View from the Earth // Space Sci. Revs.—2000.—**93**.—P. 71—96.
 22. *Belov A. V., Eroshenko E. A.* Cosmic ray observations for space weather // Proc. for the 22nd ISTC Japan Workshop on Space Weather Forecast, Nagoya University.—2002.—P. 129—146.
 23. *Belov A. V.* Forbush effects and their connection with solar, interplanetary and geomagnetic phenomena // Proc. IAU Symp.—2009.—**257**.—P. 439—450.
 24. *Belov A. V., Eroshenko E. A., Oleneva V. A., Yanke V. G.* Relation of the Forbush effects to the interplanetary and geomagnetic parameters // Proc. 27-h ICRC.—2001.—**9**.—P. 3552—3355.
 25. *Boezio G. M., Carlson P., Francke T., et al.* The cosmic ray proton and helium spectra between 0.4 GV and 200 GV // Astrophys. J.—1999.—**518**.—P. 457—472.
 26. *Cane H. V.* Cosmic ray decreases and magnetic clouds // J. Geophys. Res.—1993.—**98A**, N 3.—P. 3509—3512.
 27. *Cane H. V., Richardson I. G., von Rosenvinge T. T.* Cosmic ray decreases: 1964—1994 // J. Geophys. Res.—1996.—**101**.—P. 21561—21572.
 28. *Cane H. V.* Coronal mass ejections and Forbush decreases // Space Sci. Rev.—2000.—**93**.—P. 55—77.
 29. *Cane H. V., Richardson I. G., von Rosenvinge T. T.* Cosmic ray decreases and particle acceleration in 1978—1982 and associated solar wind structures // J. Geophys. Res.—1993.—**98**.—P. 13295—13302.
 30. *Dorman L. I., Katz M. E., Fedorov Yu. I., Shakhov B. A.* Variation of cosmic ray energy in interplanetary space // Astrophys. and Space Sci.—1983.—**94**.—P. 43—95.
 31. *Gleeson L. J., Axford W. I.* Solar modulation of galactic cosmic rays // Astrophys. J.—1968.—**154**.—P. 1011—1026.
 32. *Iucci N., Parisi M., Storini M., Villoresi G.* Forbush decreases: origin and development in the interplanetary space // Nuovo cim. C.—1979.—**2**.—P. 1—52.
 33. *Iucci N., Parisi M., Storini M., Villoresi G.* Interplanetary disturbances during Forbush decreases // Nuovo cim. C.—1984.—**7**.—P. 467—488.

34. *Kolesnik Yu. L., Shakhov B. A.* The effect of the heliopause and a standing termination shock on the propagation of galactic cosmic rays in heliosphere stationary model // *Kinematics and Physics of Celestial Bodies.*—2012.—**28**, N 6.—P. 261—269.
35. *Kolesnyk Yu. L., Shakhov B. A.* Galactic cosmic ray distribution in the simplest model of termination shock near the boundary of heliosphere // *Kinematics and Physics of Celestial Bodies.*—2009.—**25**, N 4.—P. 213—219.
36. *Kudela K., Storini M., Hofer M. Y., Belov A. V.* Cosmic rays in relation to space weather // *Space Sci. Revs.*—2000.—**93**.—P. 153.
37. *Lindblad B. A., Lundstedt H.* A catalogue of high-speed plasma streams in the solar wind // *Solar Phys.*—1981.—**74**.—P. 197—206.
38. *Lindblad B. A., Lundstedt H.* A catalogue of high-speed plasma streams in the solar wind 1975-78 // *Solar Phys.*—1983.—**88**.—P. 377—382.
39. *Lindblad B. A., Lundstedt H., Larsson B.* A third catalogue of high-speed plasma streams in the solar wind — Data for 1978—1982 // *Solar Phys.*—1989.—**120**.—P. 145—152.
40. *Lockwood J. A.* Forbush decreases in the cosmic radiation // *Space Sci. Revs.*—1971.—**12**.—P. 658—715.—doi:10. 1007/BF00173346.
41. *Mavromichalaki H., Vassilaki A.* Fast plasma streams recorded near the Earth during 1985—1996 // *Solar Phys.*—1998.—**183**.—P. 181—200.
42. *Mavromichalaki H., Vassilaki A., Marmatsouri E.* A catalogue of high-speed solar-wind streams: further evidence of their relationship to Ap-index // *Solar Phys.*—1988.—**115**.—P. 345—365.
43. *Mori S.* Theoretical calculation of the cosmic-ray solar diurnal variation. II-Meson Component // *Nuovo cimento. B.*—1968.—**58**, N 1.—P. 58—70.
44. *Parker E. N.* The passage of energetic charged particles through interplanetary space // *Planet. and Space Sci.*—1965.—**13**, N 1.—P. 9.
45. *Parker G. D.* Solar wind disturbances and recurrent modulation of galactic cosmic rays // *J. Geophys. Res.*—1976.—**81**.—P. 3825.
46. *Potgieter M. S.* Solar modulation of cosmic rays // *Liv. Rev. Solar Phys.*—2013.—**10**.—P. 3—66.
47. *Potgieter M. S.* A very local interstellar spectrum for galactic electrons, protons and helium // *Braz. J. Phys.*—2014.—**44**.—P. 581.
48. *Potgieter M. S., Vos E. E., Boezio M., De Simone N., Di Felice V., Formato V.* Modulation of galactic protons in the heliosphere during the unusual solar minimum of 2006 to 2009 // *Solar Phys.*—2013.—**289**, N 1.—P. 391—406.
49. *Ptuskin V. S., Volk H. J., Zirakashvili V. N., Breitschwerdt D.* Transport of relativistic nucleus in a galactic wind driven by cosmic rays // *Astron. and Astrophys.*—1997.—**321**, N 2.—P. 434—443.
50. *Shakhov B. A., Kolesnik Yu. L.* Heliospheric propagation of galactic cosmic rays depending on the scattering characteristics of the turbulent interplanetary magnetic field // *Kinematics and Physics of Celestial Bodies.*—2008.—**24**, N 6.—P. 280—292.
51. *Shakhov B. A., Kolesnyk Yu. L.* Effect of the heliopause and the termination shock on the galactic cosmic rays distribution in stationary model of heliosphere // *J. Phys.: Conf. Ser.*—2013.—**409**, N 1.
52. *Simpson J. A.* Cosmic-radiation intensity-time variations and their origin. III. The origin of 27-day variations // *Phys. Rev.*—1954.—**94**.—P. 426—440.
53. *Urch I. H., Gleeson L. J.* Galactic cosmic ray modulation from 1965—1970 // *Astrophys. and Space Sci.*—1972.—N 17.—P. 426—446.

54. *Venkatesan D., Shukla A. K., Agrawal S. P.* Cosmic ray intensity variations and two types of high speed solar streams // *Solar Phys.*—1982.—**81**.—P. 375—381.
55. *Vershell H. J., Mendall R. B., Korff S. A., Roelof E. C.* Two classes of cosmic ray decrease // *Geophys. Res.*—1975.—**80**.—P. 1189—1201.
56. *Webber W. R., Hiegbie P. R., McDonald F. B.* The unfolding of the spectra of low energy galactic cosmic ray H and He nuclei as the Voyager 1 spacecraft exits the region of heliospheric modulation // *arXiv — astro-ph:1308.1895-2013*.
57. *Webber W. R., McDonald F. B.* Recent Voyager 1 data indicate that on 25 August 2012 at a distance of 121.7 AU from the Sun, sudden and unprecedented intensity changes were observed in anomalous and galactic cosmic rays // *Geophys. Res. Lett.*—2013.—**40**.—P. 1665—1668.
58. *Xystouris G., Sigala E., Mavromichalaki H.* A complete catalogue of high-speed solar wind streams during solar cycle 23 // *Solar Phys.*—2014.—**289**, N 3.—P. 995.
59. *Yadav R. S., Sharma N. K., Badruddin.* Effect of two types of solar wind streams on the intensity variations of cosmic rays // *Solar Phys.*—1994.—**151**.—P. 393.

Статья поступила в редакцию 23.01.16

УДК 524.6-7

А. В. Антюфеев¹, В. М. Шульга^{1,2}, И. И. Зинченко³

¹Радиоастрономический институт Национальной академии наук Украины
ул. Краснознаменная 4, Харьков, 61002
antyuf@rian.kharkov.ua, shulga@rian.kharkov.ua

²College of Physics, Jilin University
Qianjin St. 2699, Changchun, 130012, P. R. China

³Институт прикладной физики Российской академии наук
ул. Ульянова 46, Нижний Новгород, ГСП-120, Россия, 603950
zin@appl.sci-nnov.ru

Биполярный молекулярный поток в источнике IRAS 17233-3606

На радиотелескопе APEX (Чили) проведено картографирование области звездообразования большой массы IRAS 17233-3606 в линии молекул $^{13}\text{CO}(J=2-1)$ и $\text{C}^{18}\text{O}(J=2-1)$ на длине волны 1.4 мм. Анализировалась низкоскоростная часть биполярного потока в этом источнике, а также найдены его основные параметры. Анализ производился с помощью метода расчета параметров низкоскоростной части биполярных потоков, исключая влияние окружающего неподвижного облака на рассчитываемые параметры потока. Показано, что масса низкоскоростной части потока во много раз превышает массу его высокоскоростной части, а их энергии сравнимы. Ядро молодого звездного объекта существенно деформировано влиянием биполярного потока.

БІПОЛЯРНИЙ МОЛЕКУЛЯРНИЙ ПОТІК В ОБ'ЄКТІ IRAS 17233-3606, Антюфєєв О. В., Шульга В. М., Зінченко І. І. — На радіотелескопі APEX (Чилі) проведено картографування масивної області зореутворення IRAS 17233-3606 у лініях молекул $^{13}\text{CO}(J=2-1)$ і $\text{C}^{18}\text{O}(J=2-1)$ на довжині хвилі 1.4 мм. Аналізувалась низькошвидкісна складова біполярного потоку в цьому об'єкті, а також знайдено його основні параметри. Аналіз провадився за допомогою методу розрахунку параметрів низькошвидкісної складової біполярних потоків, що виключає вплив навколишньої нерухомої хмари на розраховані параметри потоку. Показано, що маса низькошвидкісної складової потоку у багато

разів перевищує масу його високошвидкісної частини, а їхні енергії сумірні. Ядро молодого зоряного об'єкта істотно деформоване впливом біполярного потоку.

BIPOLAR MOLECULAR OUTFLOW IN IRAS 17233-3606, by Antyufeyev O., Shulga V., Zinchenko I. — The high-mass star-forming region IRAS 17333-3606 has been mapped in $^{13}\text{CO}(J = 2-1)$ and $\text{C}^{18}\text{O}(J = 2-1)$ lines in the submillimeter wavelength range. APEX (Chile) radio telescope has been used. The analysis of the low-velocity part of the molecular outflows has been carried out and the main parameters of outflow have been determined. We used a novel approach for calculation of parameters of the low-velocity part of bipolar molecular outflow in molecular clouds. The approach excludes the influence of the surrounding cloud on the parameters of the molecular outflow. Mass of the low-velocity parts is much greater than the high-velocity part of the molecular outflow and their energies are comparable. The core of the young stellar object is significantly deformed by the impact of the molecular outflow.

ВВЕДЕНИЕ

Звезды большой массы ($M > 8M_{\odot}$) играют большую роль в астрофизике, но процесс их образования пока вызывает много вопросов. Модель, принятая для описания формирования звезд малой массы, может не работать, поскольку, в частности, радиационное давление формирующейся массивной звезды может остановить дальнейшую аккрецию вещества. Предлагаются альтернативные сценарии их образования, в том числе довольно экзотические — например, путем слияния звезд меньшей массы [6]. Исследования образования звезд большой массы затрудняются и тем обстоятельством, что соответствующие объекты находятся в основном сравнительно далеко от нас, на расстояниях в несколько килопарсек.

Неотъемлемым элементом стандартной модели образования звезд путем дисковой аккреции являются молекулярные биполярные потоки вещества (в дальнейшем биполярные потоки). Такие потоки наблюдаются в областях образования звезд как малой, так и большой массы. Механизмы их образования могут быть различны, и не всегда они связаны с дисковой аккрецией [5]. Исследования таких потоков очень важны для лучшего понимания процесса звездообразования.

В большинстве случаев при оценке параметров потоков учитываются только их высокоскоростные компоненты. Известно, что это может приводить к серьезной недооценке их массы и других характеристик [2, 14]. Мы разработали оригинальную методику учета низкоскоростных составляющих потоков [1, 3].

Целью данной работы является дальнейшее изучение биполярных потоков в областях образования звезд большой массы с учетом их низкоскоростных компонентов.

В качестве объекта исследований выбрана довольно хорошо изученная и сравнительно близкая к нам область (расстояние около 1 кпк) в направлении мощного ИК-источника IRAS 17233-3606. Этот объект находится в пределах инфракрасного темного облака G 351.78-0.54. Стоит отметить, что инфракрасные темные облака считаются сейчас местами рождения звезд большой массы.

Высокоскоростной газ был обнаружен в IRAS 17233-3606 довольно давно [11, 12, 15]. Эти данные были интерпретированы как свидетельство наличия трех различных потоков в данной области [11]. Однако недавно с учетом данных новых наблюдений на VLA была предложена другая интерпретация, согласно которой здесь имеется один крупномасштабный поток, разные части которого прослеживаются в излучении разных молекул [10]. В работах [11, 12] параметры потока оценивались по высокоскоростным компонентам. В работе [15] низкоскоростные компоненты учитывались, но это было сделано лишь в одной точке источника. В работе [10] параметры потока рассчитывались по линии молекулы CS ($J = 1-0$) в диапазонах скоростей, начиная от 4 км/с и выше относительно скорости неподвижного облака. В нашей работе мы рассчитали параметры потока в более широких диапазонах скоростей, которые начинаются в непосредственной близости относительно скорости неподвижного облака (от 1 км/с). Для этого нами были проведены наблюдения этого объекта в линиях молекул ^{13}CO и C^{18}O на радиотелескопе АРЕХ. Эти наблюдения были проанализированы с использованием упомянутого выше развитого нами подхода. Результаты этого анализа представлены в настоящей работе.

НАБЛЮДЕНИЯ

Наблюдения источника IRAS 17233-3606 проводились на расположенном в Чили радиотелескопе АРЕХ в 2009—2010 гг. Основные характеристики радиотелескопа АРЕХ приведены в работе [9]. Наблюдалась одновременно линия $^{13}\text{CO}(2-1)$ и $\text{C}^{18}\text{O}(2-1)$ вблизи частоты 220 ГГц, а также некоторые другие линии, попадающие в полосу приема. Шумовая температура системы была близкой к 200 К, а спектральное разрешение составляло около 240 кГц, что соответствует 0.3 км/с. Ширина диаграммы направленности на этой частоте — приблизительно 28'. Эффективность главного луча диаграммы направленности радиотелескопа составляла 75%. Наблюдения проводились в режиме навод-отвод. Наличие слабого излучения ^{13}CO на опорной позиции приводило к появлению узкой «отрицательной» детали в профиле линии ^{13}CO в исследуемой области. Общий размер наблюдавшейся области довольно велик, но в данной работе мы обсуждаем только ту ее часть вблизи IRAS 17233-3606, где наблюдается биполярный поток.

**ОБЛАСТЬ ЗВЕЗДООБРАЗОВАНИЯ,
СВЯЗАННАЯ С ИСТОЧНИКОМ IRAS 17233-3606**

На рис. 1 приведены интегральные карты излучения линий молекул $C^{18}O$ ($J = 2-1$) и ^{13}CO ($J = 2-1$) в источнике IRAS 17233-3606. Все карты, приведенные в данной работе, центрированы относительно координат $_{2000} = 17^h 26^m 42.8^s$ и $_{2000} = -36\ 09\ 17$. Из рис. 1 видно, что молекулярное облако имеет размеры более $100''$, что соответствует пространственному размеру более $100\ 000$ а. е. при расстоянии до источника 1 кпк [11]. Излучение линий молекул $C^{18}O$ ($J = 2-1$) и ^{13}CO ($J = 2-1$) имеют максимумы, положение которых близко к положению инфракрасного источника IRAS 17233-3606.

Наблюдения источника IRAS 17233-3606 [11, 12], проведенные в линиях молекул ^{13}CO и ^{12}CO , показали, что в этих линиях наблюдается биполярный поток. Эти исследования были посвящены высокоскоростной части потока. Цель нашей работы — проанализировать биполярный поток в этом источнике в диапазоне скоростей, лежащих ближе к систематической скорости окружающего облака (центральная скорость), т. е. провести анализ низкоскоростной части потока.

На рис. 2 представлены карты интегрального синесмещенного и красносмещенного компонентов излучения линии молекулы $C^{18}O$ ($J = 2-1$), из которого хорошо виден биполярный характер излучения линии. Эту биполярность мы интерпретируем как низкоскоростную часть биполярного потока, а не вращение молекулярного облака по следующим причинам. Сравнение карт на рис. 2 с аналогичными картами биполярного потока в линии ^{12}CO (рис. 2 работы [12]) показало, что расположение красносмещенных/синесмещенных компонентов на этих рисунках близко. Если интерпретировать биполяр-

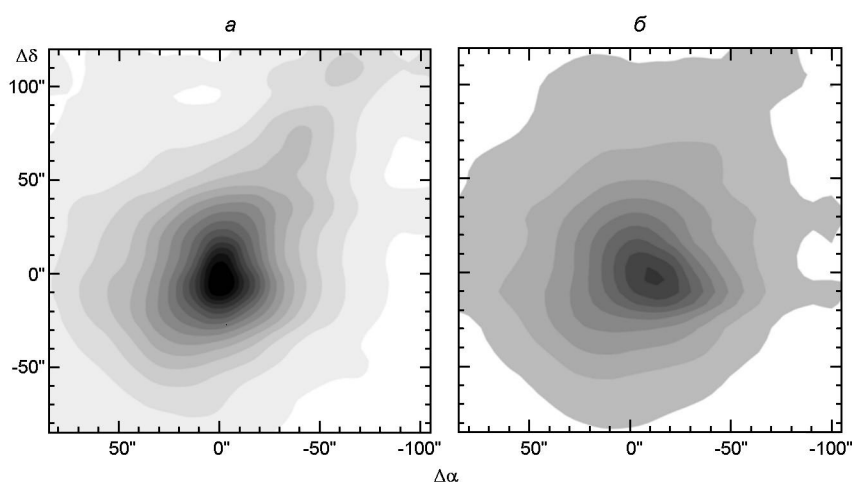


Рис. 1. Интегральные карты излучения линий молекул $C^{18}O$ ($J = 2-1$) (а) и ^{13}CO ($J = 2-1$) (б) в источнике IRAS 17233-3606. Контуры проведены с шагом 4 К км/с (начальный уровень 4 К км/с) для молекулы $C^{18}O$ и с шагом 20 К км/с (начальный уровень 10 К км/с) для молекулы ^{13}CO

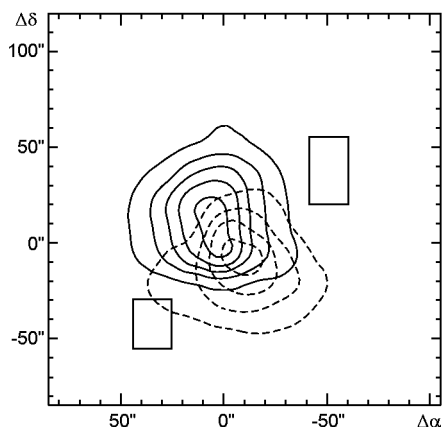


Рис. 2. Карты интегрального синесмещенного и красносмещенного компонентов излучения линии молекулы $C^{18}O(J=2-1)$. Диапазон скоростей составляет $-12...-5.7$ км/с для синесмещенного компонента и $-0.1...5$ км/с для красносмещенного компонента. Прямоугольниками показаны области, используемые для определения центральной скорости неподвижного облака. Контуры проведены с шагом 1 К км/с (начальный уровень 1 К км/с)

ность на рис. 1 как вращение, то ось этого вращения окажется перпендикулярной к оси биполярного потока ^{12}CO . Кроме этого, в данной работе не рассматривается диапазон скоростей непосредственно вблизи центральной скорости окружающего облака (ближе 1 км/с). Маловероятно, что на значительных расстояниях от центра потока (карта охватывает десятки тысяч астрономических единиц), будет проявляться вращение с столь значительными скоростями.

МЕТОД РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ БИПОЛЯРНОГО ПОТОКА

Сравнение спектров из синесмещенного и красносмещенного компонентов потока показывает, что в данном объекте весь спектр излучения сдвинут вдоль оси потока. Для расчетов параметров низкоскоростной части биполярного потока применялся соответствующий метод расчета параметров низкоскоростной части биполярных потоков (МНСБП) [1], который учитывает такой сдвиг. В методе выделяются вклады неподвижного стационарного облака и биполярного потока и определяются их спектры. По найденным спектрам определяются нижний предел характеристик биполярного потока. В данной работе расчет проводится по линиям молекул $^{13}CO(J=2-1)$ и $C^{18}O(J=2-1)$.

В методе МНСБП необходимо определить центральную скорость стационарного облака. Эта скорость определялась по спектрам излучения линии молекулы $C^{18}O$. Для определения центральной скорости неподвижного облака выбраны две прямоугольные области, где нет излучения красносмещенного и синесмещенного компонентов потока (рис. 2):

$$25 \quad 45, - \quad -30$$

и

$$-60 \quad -40, \quad 55^\circ.$$

В пределах этих областей спектры линии молекулы $C^{18}O$ были аппроксимированы гауссианой. Усредненное по результатам аппроксимаций значение средней скорости стационарного облака составило $V_0 = -2.8$ км/с.

В центральной части источника IRAS 17233-3606 на некоторых позициях, лежащих вблизи центра потока, наблюдается эффект самообращения спектров. Эффект проявлялся как в линии молекулы $C^{18}O$, так и ^{13}CO . Анализ спектров показал, что эффект самообращения проявляется в пределах лучевых скоростей $-3.5...-1.5$ км/с для линии $C^{18}O$ и $-4.5...-0.5$ км/с для линии ^{13}CO . Метод МНСБП не учитывает этот эффект, поэтому соответствующие части спектра исключены из расчетов. Расчет параметров биполярного потока проводился по линии $J = 2-1$ молекулы $C^{18}O$ в диапазонах скоростей $-10...-3.5$ км/с (синесмещенный компонент) и $-1.5...5$ км/с (красносмещенный компонент); а также по линии $J = 2-1$ молекулы ^{13}CO в диапазонах скоростей $-20...-10$ км/с (синесмещенный компонент) и $5...10$ км/с (красносмещенный компонент).

Таким образом, в данной работе биполярный поток анализируется в диапазонах лучевых скоростей $-20...-3.5$ км/с и $-1.5...10$ км/с.

Отношение концентраций молекул H_2 к ^{13}CO и к $C^{18}O$ вычислялось согласно методике, изложенной в работе [13] с учетом галактоцентрического расстояния источника IRAS 17233-3606 [7]. Получены значения

$$\begin{aligned} n(H_2) / n(C^{18}O) &= 53.3 \cdot 10^5, \\ n(H_2) / n(^{13}CO) &= 8.9 \cdot 10^5, \\ n(^{13}CO) / n(C^{18}O) &= 6. \end{aligned}$$

При расчете параметров биполярного потока не делалась коррекция на наклон оси биполярного потока к лучу зрения. Температура возбуждения молекул ^{13}CO и $C^{18}O$ предполагалась равной 50 К [12].

Масса ядра молекулярного облака определялась по излучению молекулы $C^{18}O$. Следует отметить, что вследствие эффекта самообращения в центре линии масса ядра облака недооценена, и найденное значение представляет собой нижний предел массы.

УЧЕТ ОПТИЧЕСКОЙ ТОЛЩИНЫ

Учет оптической толщины проводился по методике, изложенной в работе [8]. В данной работе эта методика применена для молекул $^{13}CO(J=2-1)$ и $C^{18}O(J=2-1)$. Диапазоны лучевых скоростей, где проводился поиск, ограничивались, с одной стороны, наличием излучения линии $C^{18}O$ (максимальные пределы), а с другой — отсутствием эффекта самообращения спектра линии ^{13}CO (минимальные пределы). В этих диапазонах ($10...-4.5$ км/с, $-0.5...5$ км/с) отношение интенсивностей излучения линий $T_{mb}(^{13}CO)$ и $T_{mb}(C^{18}O)$ усредненных красносмещенных и синесмещенных компонентов близко к 5. Оптические толщины линий ^{13}CO и $C^{18}O$ рассчитывалась из соотношений

$$\begin{aligned} T_{mb}(^{13}CO) / T_{mb}(C^{18}O) &= 1 \exp(\tau_{^{13}CO}) / \exp(\tau_{C^{18}O}), \\ n(^{13}CO) / n(C^{18}O) &= \tau_{^{13}CO} / \tau_{C^{18}O}. \end{aligned}$$

Таблица 1. Оптические толщины линий ^{13}CO и C^{18}O в диапазоне лучевых скоростей $-10\dots-4.5$ км/с, $-0.5\dots 5$ км/с

Молекула		$\tau / (1 - \exp(-\tau))$
C^{18}O	0.077	1.04
^{13}CO	0.46	1.25

Найденные значения оптических толщин, а также корректирующие множители для учета эффекта оптической толщины представлены в табл. 1.

Массы биполярного потока в данном диапазоне скоростей, рассчитанные по молекулам C^{18}O и ^{13}CO , ($120M_{\odot}$ и $130M_{\odot}$), как и должно быть, практически совпадают.

Полученное значение оптической толщины $\tau_{^{13}\text{CO}} = 0.46$ превышает аналогичное значение 0.3, полученное в более высокоскоростном диапазоне лучевых скоростей [11], что также ожидаемо.

В дальнейшем коррекция на оптическую толщину использовалась для расчетов параметров биполярного потока в линии молекулы C^{18}O . Анализ в линии ^{13}CO проводился в более высокоскоростном диапазоне, где линия ^{13}CO считалась оптически тонкой.

РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА БИПОЛЯРНОГО ПОТОКА

На рис. 3 показаны карты распределения интегральной интенсивностей красносмещенного (пунктирная линия) и синесмещенного (сплошная линия) компонентов биполярного потока в области IRAS 17233-3606 в линии $J = 2-1$ молекулы C^{18}O , полученные интегрированием профиля наблюдаемых линий по фиксированным пределам (рис. 3, а) и с помощью метода МНСБП (рис. 3, б). Фоновым серым цветом показано распределение рассчитанной интегральной интенсивности молекулярного облака (рис. 3, а) и стационарного облака (рис. 3, б).

Метод МНСБП исключает вклад излучения стационарного облака в рассчитанные спектры потока, в результате чего на рис. 3, б красносмещенный и синесмещенный компоненты потока разделены. Стационарное облако вытянуто перпендикулярно к направлению потока и занимает значительную часть молекулярного облака. В направлении потока значительная часть вещества сметена и участвует в биполярном движении. Из рис. 3, б видно, что значительная часть вещества, находящегося в потоке, покинула плотное ядро молодого звездного объекта и распространяется в среде с относительно низкой плотностью.

На рис. 4 показана карта распределения интегральной интенсивностей красносмещенного (пунктирная линия) и синесмещенного (сплошная линия) компонентов биполярного потока в области IRAS

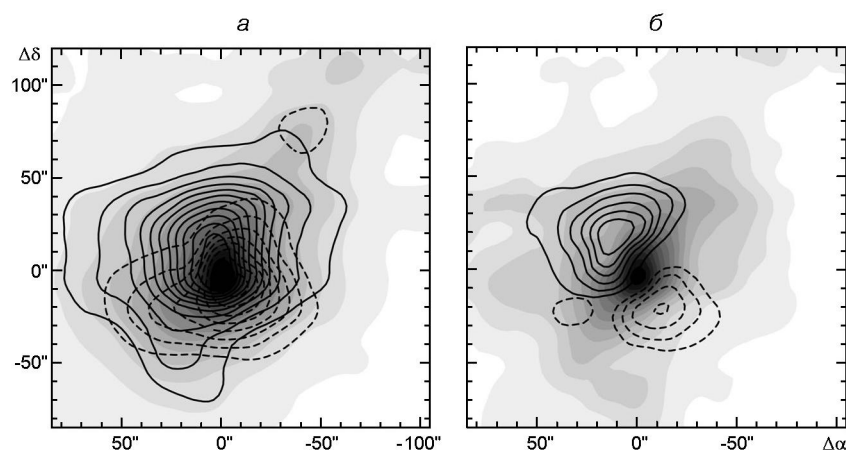


Рис. 3. Карты распределения интегральных интенсивностей красномещенного и синемещенного компонентов биполярного потока в объекте G351.78-0.54 в линии $J = 2-1$ молекулы $C^{18}O$, полученные интегрированием профиля наблюдаемых линий по фиксированным пределам (а) и с помощью метода МНСБП (б). Серым цветом показано распределение рассчитанной интегральной интенсивности молекулярного облака (а) и стационарного облака (б). Контуры проведены с шагом 4 К км/с (начальный уровень 4 К км/с) для интегральной интенсивности молекулярного и стационарного облака и с шагом 2 К км/с (начальный уровень 4 К км/с) для биполярного потока $C^{18}O$

17233-3606 в линии $J = 2-1$ молекулы ^{13}CO , полученные помощью метода МНСБП. Сравнение карт низкоскоростной части потока (рис. 3, 4) и высокоскоростной части (рис. 2 [12], рис. 3 [11]) показывает, что направление распространения низкоскоростной части потока близко к направлению его высокоскоростной части. Также нужно отметить, что низкоскоростные компоненты занимают большую площадь на небесной сфере, чем высокоскоростные.

Результаты расчетов параметров низкоскоростной части потока биполярного потока и ядра молекулярного облака приведены в табл. 2. Различие параметров потока, определенных по молекулам ^{13}CO и $C^{18}O$, объясняется разными диапазонами скоростей, в которых проводился расчет. Сравнение массы низкоскоростной части потока, полученной в данной работе (сумма масс потока, определенных по молекулам ^{13}CO и $C^{18}O$ в табл. 2), с массой более высокоскоростных компонентов ($\sim 3M_{\odot}$ [11] и $42.4M_{\odot}$ [10]) показывает, что масса потока увеличивается по мере приближения анализируемого диапазона к центральной скорости. Общая масса потока составляет 24 % от массы ядра молекулярного облака.

Расчет турбулентной энергии и энергии связи ядра молекулярного облака производился по методике [4]. Из табл. 2 видно, что суммарная энергия высокоскоростной ($6 \cdot 10^{39}$ Дж данные приведены в [11]) и низкоскоростной частей ($1.8 \dots 2.1 \cdot 10^{39}$ Дж) биполярного потока сравнима с турбулентной кинетической энергией ядра молекулярного облака.

Таким образом, этот поток обладает потенциалом, чтобы стать мощным источником энергии для турбулентных движений в молекулярном облаке.

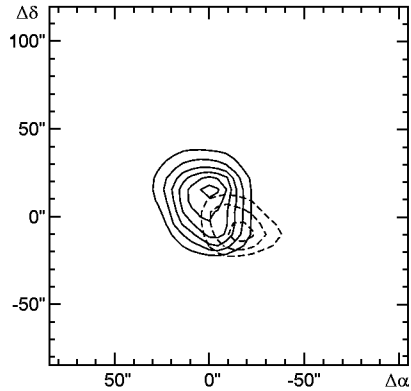


Рис. 4. Карта распределения интегральных интенсивностей красномещенного и синесмещенного компонентов биполярного потока в объекте IRAS 17233-3606 в линии $J = 2-1$ молекулы ^{13}CO . Контуры проведены с шагом 2 К км/с (начальный уровень 4 К км/с)

Таблица 2. Параметры низкоскоростной части биполярного потока в источнике IRAS 17233-3606

Параметр	C^{18}O	^{13}CO
Диапазоны скоростей, в которых проводился расчет параметров биполярного потока, км/с	-10...-3.5 -1.5...5	-20...-10 5...10
Масса ядра молекулярного облака, M / M_{\odot}	721	
Масса биполярного потока, M / M_{\odot}	156	17
Импульс биполярного потока, (M / M_{\odot}) км/с	490	185
Энергия биполярного потока, 10^{39} Дж	1.8	2.1
Турбулентная кинетическая энергия ядра молекулярного облака, 10^{39} Дж	4.4	
Энергия связи ядра молекулярного облака, 10^{39} Дж	8.8	

Энергия биполярного потока сравнима с энергией связи ядра молекулярного облака. Соотношение этих энергий указывает на то, что биполярный поток имеет потенциальную возможность рассеять в будущем ядро родительского молекулярного облака. Плотное ядро облака подвергается существенному воздействию потока, что отражается на его форме (рис. 3, б).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Картографирование области звездообразования большой массы IRAS 17233-3606 в линиях молекулы $^{13}\text{CO}(J = 2-1)$ и $\text{C}^{18}\text{O}(J = 2-1)$ показало, что данный объект в этих линиях обладает ярко выраженной биполярной структурой, проявляющейся в систематическом сдвиге профиля линии при изменении расстояния от центра потока. Эта биполярность интерпретируется нами как низкоскоростная часть биполярного потока. Для анализа параметров потока был применен метод МНСБП, который позволяет разделить вклады молекулярного потока и неподвижного окружающего облака.

Показано, что направление распространения низкоскоростной части потока близко к направлению его высокоскоростной части. Область пространства, занимаемая высокоскоростной частью потока су-

щественно меньше области, занимаемой низкоскоростной частью. Показано, что масса низкоскоростной части потока более чем 50 раз больше массы его высокоскоростной части, а их энергии сравнимы. Энергия молекулярного потока сравнима с турбулентной энергией и энергией связи ядра молекулярного облака.

Данные исследования были выполнены в рамках НИР «Исследования звездообразования в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах длин волн» (№ госрегистрации 0115U004230), «Исследование кинематики и пространственного распределения молекулярного вещества в областях активного звездообразования» (№ госрегистрации 0112U000035), а также поддерживались грантом РФФИ (№ 14-02-90441).

1. *Antyufeyev A., Shulga V.* Bipolar outflow in the vicinity of IRAS 05345+3157 in ¹³CO line // *Kinematics and Physics of Celestial Bodies.*—2011.—**27**, N 6.—P. 282—290.
2. *Antyufeyev A., Shulga V.* Bipolar molecular outflows in the star forming region IRAS 22267+6244 // *Radio Phys. and Radio Astron.*—2012.—**3**, N 1.—P. 27—32.
3. *Antyufeyev A., Shulga V.* Method for calculating low-velocity bipolar outflow parameters in massive star formation regions // *Kinematics and Physics of Celestial Bodies.*—2014.—**30**, N 3.—P. 137—146.
4. *Arce H., Goodman A.* The episodic, precessing giant molecular outflow from IRAS 04239+2436 (HH 300) // *Astrophys. J.*—2001.—**554**, N 1.—P. 132—151.
5. *Arce H., Shepherd D., Gueth F., et al.* Molecular outflows in low- and high-mass star-forming regions // *Protostars and planets V.*—2007.—P. 245—260.
6. *Bonnell I., Bate M., Zinnecker H.* On the formation of massive stars // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—1998.—**298**.—P. 93—102.
7. *Chin Y., Henkel C., Whiteoak J., et al.* Interstellar sulfur isotopes and stellar oxygen burning // *Astron. and Astrophys.*—1996.—**305**.—P. 960—969.
8. *Garden R., Hayashi M., Hasegawa T., et al.* A spectroscopic study of the DR 21 outflow source. III - The CO line emission // *Astrophys. J.*—1991.—**374**.—P. 540—554.
9. *Güsten R., Nyman L., Schilke P., et al.* The Atacama Pathfinder EXperiment (APEX) — a new submillimeter facility for southern skies // *Astron. and Astrophys.*—2006.—**454**.—P. 13—16.
10. *Klaassen P., Johnston K., Leurini S., Zapata L.* The SiO outflow from IRAS 17233-3606 at high resolution // *Astron. and Astrophys.*—2015.—**575**.—P. A54.
11. *Leurini S., Codella C., Zapata L., et al.* Extremely high velocity gas from the massive young stellar objects in IRAS 17233-3606 // *Astron. and Astrophys.*—2009.—**507**.—P. 1443—1454.
12. *Leurini S., Hieret C., Thorwirth S., et al.* High-mass star formation in the IRAS 17233-3606 region: a new nearby and bright hot core in the southern sky // *Astron. and Astrophys.*—2008.—**485**.—P. 167—175.
13. *Liu T., Wu Y., Zhang H.* Gaseous CO abundance — an evolutionary tracer for molecular clouds // *Astrophys. J. Lett.*—2013.—**775**.—P. L2.
14. *Tafalla M., Myers P.* Velocity shifts in L1228: the disruption of a core by an outflow // *Astrophys. J.*—1997.—**491**, N 2.—P. 653—662.
15. *Zinchenko I.* Statistics of high-velocity outflows in regions of massive star formation // *Astron. Lett.*—2002.—**28**.—P. 316—323.

Статья поступила в редакцию 01.12.15

УДК 523.45:523.035.332.3

А. П. Видьмаченко

Главная астрономическая обсерватория Национальной академии наук Украины
ул. Академика Заболотного 27, Киев, 03680
vida@mao.kiev.ua

Сезонные изменения на Юпитере. 2. Влияние облучения планеты Солнцем

Наше исследование характера изменения визуального блеска Юпитера с 1850 г. указывает на преимущественное влияние 22.3-летнего хейловского магнитного цикла солнечной активности на происходящие в тропосфере процессы на уровне формирования верхней кромки облаков. Максимальные значения интегрального блеска Юпитера приходятся на солнечный цикл с максимальным за последние 165 лет числом Вольфа (около 1957 г.). Минимальные оценки блеска были получены в 1855 г., когда в цикле солнечной активности № 12 число Вольфа было минимальным. Исследование отражательных характеристик полушарий Юпитера в визуальном участке спектра в 1962—2015 гг. показало попеременное увеличение яркости южных и северных тропических и умеренных областей за один период его обращения вокруг Солнца. Такое изменение яркости и усиление активности разных полушарий планеты может указывать на то, что в атмосфере происходит периодическая глобальная перестройка системы циркуляции, структуры облачных слоев и надоблачной дымки. Это говорит о связи наблюдаемых вариаций отражательных свойств исследуемых широтных поясов Юпитера с изменением наклона осей вращения самой планеты и ее магнитного поля к плоскости орбиты; т. е. о сезонной перестройке в атмосфере. Сравнение временной зависимости фактора A_j активности полушарий Юпитера в видимом диапазоне спектра с изменением индекса R солнечной активности показывает, что с 1962 г. по 1995 г. эти параметры изменялись практически синхронно с некоторым запаздыванием реакции в видимом облачном слое на режим облучения атмосферы Солнцем. Анализ показывает, что вариации отражательных характеристик полушарий Юпитера реагирует на 21 % изменение облучения разных полушарий при движении планеты по орбите с

запаздыванием на шесть лет. Такое запаздывание совпадает со временем радиационной релаксации водородно-гелиевой атмосферы в условиях Юпитера. Происшедшее после 1997 г. рассогласование их хода можно объяснить несогласованным воздействием упомянутых трех причин на атмосферу планеты.

СЕЗОННІ ЗМІНИ НА ЮПІТЕРІ. 2. ВПЛИВ ОПРОМІНЕННЯ ПЛАНЕТИ СОНЦЕМ, Відьмаченко А. П. — Наше дослідження характеру зміни візуального блиску Юпітера з 1850 року вказує на переважний вплив 22.3-річного хейлівського магнітного циклу сонячної активності на процеси, що відбуваються у тропосфері на рівні формування верхньої кромки хмар. Максимальні значення інтегрального блиску Юпітера припадають на сонячний цикл з максимальним за останні 165 років числом Вольфа (близько 1957 р.). Мінімальні оцінки блиску були отримані в 1855 р., коли в циклі сонячної активності № 12 число Вольфа було мінімальним. Дослідження відбивних характеристик півкуль Юпітера у візуальній ділянці спектру в 1962—2015 рр. показало почергове збільшення яскравості південних і північних тропічних та помірних областей за один період його обертання навколо Сонця. Така зміна яскравості і посилення активності різних півкуль планети може вказувати на те, що в атмосфері відбувається періодична глобальна перебудова системи циркуляції, структури шарів хмар і туману над хмарами. Це говорить про зв'язок спостережуваних варіацій відбивних властивостей досліджуваних широтних поясів Юпітера зі зміною нахилу осей обертання самої планети і її магнітного поля до площини орбіти, тобто про сезонну перебудову в атмосфері. Порівняння часової залежності фактора A_j активності півкуль Юпітера у видимому діапазоні спектру зі зміною індексу R сонячної активності показує, що з 1962 р. по 1995 р. ці параметри змінювалися практично синхронно з деяким запізнюванням реакції у видимому шарі хмар на режим опромінення атмосфери Сонцем. Аналіз залежності відбивних характеристик півкуль Юпітера показує запізнювання на шість років як реакцію на 21 % зміни опромінення різних півкуль при русі планети по орбіті. Таке значення збігається зі значенням часу радіаційної релаксації воднево-гелієвої атмосфери в умовах Юпітера. Те, що після 1997 р. має місце неузгодженість їхнього ходу, можна пояснити неузгодженим впливом згаданих трьох причин на атмосферу планети.

SEASONAL CHANGES ON JUPITER. 2. THE EFFECT OF SUN IRRADIATION ON THE PLANET, by Vidmachenko A. P. — Our investigation of changes in the character of Jupiter's visual brightness since 1850, indicating a much more pronounced effect of 22.3-year-old Hale magnetic cycle of solar activity on the processes occurring in the troposphere at the level of the upper edge of clouds formation. The maximum value of the Jupiter's integral brightness is near the maximum of the solar cycle over the last 165 years of Wolf number (about 1957). The minimal estimates of the brightness

were obtained in 1855, when in the solar cycle number 12 Wolf number was minimal. Investigation of reflection characteristics of Jupiter hemispheres in the visual region of spectrum in 1962-2015 showed brightness increasing in the alternately northern and southern tropical and temperate regions during of its revolution around the Sun. Such a brightness changing and the increased activity of the different planet's hemispheres may indicate that periodically restructuring the global atmospheric circulation system, the structure of cloud layers and above clouds haze. This indicates that the observed variations in the reflective properties of the Jupiter's latitudinal belts are associated with tilting of rotation axes of the planet and its magnetic field to the orbital plane; i. e. about the existence of seasonal reconstruction of the atmosphere. Comparison of the time dependence of activity factor A_j for Jupiter's hemispheres in the visible spectrum with a change of solar activity index R , it shows that from 1962 to 1995, these parameters have changed almost simultaneously with some lag of reaction in the visible cloud layer of the planet's atmosphere on the Sun's irradiation mode. Analysis of the dependence of reflection characteristics of the Jupiter's hemispheres shows the lag for ~ 6 years, as a reaction to a 21% changing of irradiation of different hemispheres during the motion of the planet in its orbit. This value coincides with the value the radiative relaxation time of hydrogen-helium atmosphere in conditions of Jupiter. After 1997 has occurred discrepancy of their course. This can be explained by the influence of incoherent the mentioned causes on the planet's atmosphere.

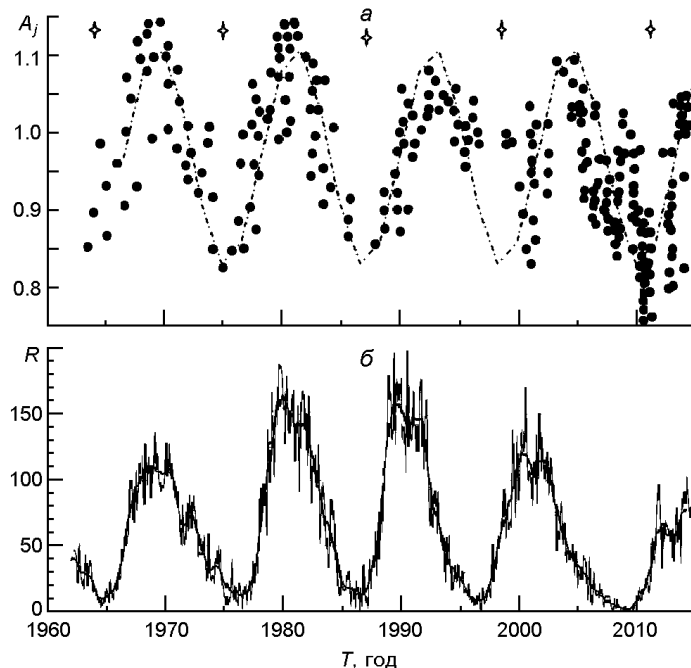
Введение. В работе [77] мы показали, что при движении Юпитера по орбите вокруг Солнца имеет место осязательное различие притока солнечной энергии к разным широтам. Это является причиной изменения оптических и физических характеристик атмосферы [72, 74, 76, 85]. Обычно для Юпитера сезонному фактору не уделялось внимания из-за малого наклона его оси вращения к плоскости орбиты (всего 3.13°). Однако в работах [77, 79, 83, 85] мы предложили учитывать ее движения по орбите и принимать во внимание геометрическую модуляцию из-за изменения магнитной ювиграфической широты Земли m . Ее можно вычислить по формуле $m = E \cos(\theta_0)$, где $E = 3.13^\circ$, угол между магнитной осью и осью вращения Юпитера доходит до 10° , а θ_0 — текущее значение планетоцентрической долготы и долготы северного магнитного полюса планеты. При таких условиях за год на Юпитере величина m изменяется от -13.13 до $+13.13^\circ$, что дает изменение положения подсолнечной точки на магнитосфере Юпитера на 26.26° . Из-за эксцентриситета орбиты ($e = 0.048450$) северное полушарие получает почти на 21 % больший приток солнечной энергии к атмосфере [34], поскольку в летнее солнцестояние планета находится в перигелии. Вышеупомянутые наши исследования показали наличие цикличности изменения предложенного нами фактора активности A_j полушарий планеты с периодом около 11.86 лет, что соответствует ее периоду обращения вокруг

Солнца. Анализ выполненных нами в 1977—1995 гг. наблюдений, дополненных многочисленными данными, полученными многими исследователями за период с 1962 по 2015 гг., позволил нам говорить о сезонной перестройке физических параметров атмосферы Юпитера [83].

Изменение активности диска и полушарий Юпитера. В работах [23, 25, 38, 39, 54, 55] была обнаружена цикличность изменения блеска всего диска Юпитера с периодами от 3 до 25 лет. Выполненный нами анализ [6] рядов звездной величины Юпитера M_J в фильтре V , полученных с 1850 по 1991 г. [10, 12, 44, 45, 70, 72, 77], и их сравнение с рядами чисел Вольфа W показали, что в максимумах солнечной активности (СА) наблюдаются минимумы значений звездной величины для нечетных и максимумы для четных циклов СА. То есть, в изменении блеска Юпитера в видимом свете значительно нагляднее проявлялся 22.3-летний хейловский магнитный цикл, а не 11.1-летний цикл солнечной активности. В работе [77] мы также получили, что максимальные значения интегрального блеска Юпитера группируются вокруг солнечного цикла с максимальным за последние 165 лет числом Вольфа (около 1957 г.), а минимальные оценки блеска получены в 1855 г., когда в цикле № 12 солнечной активности имело место минимальное значение числа Вольфа.

К совокупности имеющихся данных в работе [71] мы применили нашу успешно использованную в [62] программу спектрального анализа фотометрических рядов наблюдательных данных по методу максимума энтропии. Кроме вариаций с вышеупомянутыми значениями периодов изменения визуального блеска Юпитера, нам также удалось обнаружить вариации с удвоенным значением орбитального периода (23.9 г.), с орбитальным периодом (11.88 г.) и подтвердить наличие периодической составляющей около 3.4 лет [23, 38, 39, 54, 55]. Последнее значение, по нашему мнению, может быть объяснено суперпозицией периодов 23.9 и 11.1 г. цикла солнечной активности, и/или 22.3-летнего хейловского магнитного цикла СА и самого орбитального периода Юпитера [83].

Изменение притока солнечного излучения к атмосфере Юпитера из-за вариаций солнечной активности глобально влияет на всю планету. Именно это и наблюдается в характере изменения интегрального блеска Юпитера в видимом свете. А сезонные циклы должны проявиться в изменении оптических свойств то южного, то северного полушарий планеты. Исходя из этого, по приведенной в работе [66] для Сатурна методике мы проанализировали экспериментальные данные работ [1, 2, 9, 10, 12—16, 20, 23—27, 32, 33, 38, 39, 42—47, 49, 52—54, 56—61, 63—65, 68, 72, 77, 79, 86—88] об относительном распределении яркости вдоль центрального меридиана Юпитера, дополненные изображениями планеты в видимых лучах, полученными с 1960-х по 2015 г. любителями астрономии с помощью малых телескопов [83]. Всего мы оцифровали 270 таких изображений, получили фотометрические сканы вдоль центрального меридиана и нормировали их на яр-



Вариации со временем фактора A_j активности полушарий Юпитера (a) и индекса R солнечной активности (b) от 1960 по 2015 гг. (http://sidc.oma.be/html/sidc_graphics.html)

кость самой светлой на меридиане детали (I/I_{\max}). При анализе этих результатов мы получили, что на широтах, где располагаются тропические и умеренные зоны и полосы, облачный слой попеременно становился самым светлым на видимом диске. По оцифрованным нормированным значениям относительной интенсивности для одинаковых пространственных участков на видимой поверхности облачного слоя планеты вычислялось отношение яркости A_j северной к южной части тропических и умеренных широтных поясов.

Вычисленные значения фактора активности A_j приведены на рисунке (фрагмент a) точками. Звездочками отмечены моменты прохождения Юпитера через перигелий орбиты на расстоянии около 4.96 а. е. от Солнца. Эти моменты практически совпадают с моментом летнего солнцестояния для северного полушария планеты в 1963.8, 1975.6, 1987.5, 1998.7 и 2010.6 гг. Штрихпунктирной линией показана аппроксимирующая синусоида со значением периода 11.91 ± 0.07 земных лет [83]. Как видно, в 1965, 1972, 1978, 1984, 1990, 1996, 2002, 2007 и 2013 гг. эта линия проходит через значение $A_j = 1$, когда яркости выбранных областей были приблизительно одинаковы. Такие «узлы» повторяются через время несколько меньше чем 6 лет, что практически совпадает с полупериодом обращения Юпитера вокруг Солнца.

Из анализа вариаций значений A_j следует, что в северном полушарии светлые тропические и умеренные широтные пояса были ярче чем в южном полушарии на 14 % в 1968—1970 гг., 1979—1981 гг., на 7 % в

1991—1994 гг., на 10 % в 2003.6—2005.2 гг. и на 6 % после 2014 г. В южном полушарии светлые тропические и умеренные широтные пояса были ярче, чем в северном полушарии на 12—16 % в 1963—1964, 1974—1976, 1985—1987, 2000, 2007—2008 гг., и на 20—25 % в 2010—2013 гг. Максимальное отношение яркостей A_j имело место в 1969—1970, 1981, 1991—1995, 2003.5—2005.2 и 2015 гг., что практически совпадает с положением Солнца в афелии. Минимальные отношения яркостей A_j было в 1963—1964, 1975.6, 1987.5, 1998.7 и 2010.6 гг. на минимальном расстоянии Юпитера до Солнца в перигелии. В это время северное полушарие планеты максимально нагревалось Солнцем и становилось темнее. Темные тропические и умеренные пояса (NEB, NTrB) были темнее в северном полушарии, чем аналогичные пояса в южном полушарии, почти всегда в моменты, близкие к афелию: 1967.1, 1979.1, 1991.8, 1994.6, 2000.7—2002.2, 2005.1, 2007—2009.3, 2010.4—2011.25, 2012.7—2012.9 гг.

После 1995 г. стало заметным некоторое нарушение периодичности изменения величины A_j относительно чередования моментов перигелия и афелия.

В 1964, 1975, 1987 гг. в моменты пребывания Юпитера в перигелии имело место летнее солнцестояние для северного полушария. В эти моменты оно максимально нагревалось Солнцем и было темнее. Активность Солнца в 1964, 1976 и 1987 гг. была близкой к минимальной.

В 1969—1970 и 1980—1981 гг. планета проходила афелий. При этом она получала на 21 % меньше энергии Солнца, и ее северные умеренные и тропические широты становились светлее. Активность Солнца в эти моменты была максимальной ($R = 130$ и 170 соответственно). В 1993 г. Юпитер снова проходит афелий орбиты. В это время имело место солнцестояние для южного полушария, а Солнце только что прошло самый большой с 1960 г. максимум при $R = 198$. В 1996—1997 гг. Солнце прошло через минимум активности, а Юпитер продолжал свой путь к перигелию в конце 1998 г. В 1993—2000 гг. яркость обоих полушарий была почти одинаковой.

После лета в северном полушарии в 2000—2002 гг. планета идет к осеннему равноденствию. При этом с 1998 по 2003 год увеличивается активность Солнца до значения индекса $R = 130...140$. В 2000—2001 гг. северные умеренно-тропические широты почти на год становятся темнее на 15 %; а с 2001 по 2004 гг. постепенно темнеют и снова становятся темнее на 5—9 % южные умеренно-тропические широты. В самом начале 2004 г. на несколько месяцев резко потемнело почти все южное полушарие, но уже в середине 2004 г. и до конца 2005 г. быстро начинает светлеть южное полушарие и темнеет северное. После 2003 г. до 2010 г. монотонно от $R = 60$ почти до нуля падает активность Солнца, а Юпитер в 2005 г. прошел афелий и идет к перигелию в 2010.8 г. С начала и до конца 2008 г. несколько темнеют южные умеренные широты, но уже в начале 2009 г. снова резко начинает светлеть

почти все южное полушарие до полярных широт; при этом северное полушарие остается темным. Такими они оставались с 2010 г. до середины 2012 г. С конца 2012 г. южное весеннее полушарие, оставаясь светлым, немного «замылось» темным веществом, тогда как в северных умеренных широтах начала проявляться светлая зона, которая после 2014 г. по яркости превысила соответствующие широты противоположного полушария. В 2012—20015 гг. активность Солнца имеет широкий максимум со значениями $R = 60...80$.

Что же происходит на Юпитере? Из рисунка следует, что введенный нами фактор A_j активности полушарий Юпитера не всегда изменяется симметрично относительно значения $A_j = 1$. Так, в 1969, 1981, 1993, 2004.5 и 2015 гг. Юпитер проходил через афелий своей орбиты сначала (в первые две даты) практически в моменты максимумов солнечной активности, а затем постепенно сдвигался на 1-2 г. после максимума, т. е. уже на спаде СА. Это вызвано тем, что период обращения Юпитера вокруг Солнца имеет значение T_j 11.86 г., а период СА — T_{SA} 11.1 г. Солнечную активность можно характеризовать индексом активности R (рисунок), зависимость которого со временем имеет довольно широкие максимумы со средними значениями $R = 105, 155, 170, 115$ и 70 , соответственно в 1967—1970, 1979—1982, 1989—1992, 1999—2003 и 2011—2015 гг. В близкие к этим датам моменты времени лето на планете было в южном полушарии.

В годы с наибольшей СА, или сразу же после них, светлые тропические и умеренные широтные зоны (NTrZ, NTZ) были ярче в северном полушарии по сравнению с аналогичными южными широтами (в 1968—1970, 1979—1981, 1991—1994, 2003.6—2005.2 гг. и после 2014 г.). Темные тропические и умеренные пояса NEB и NTrB в северном полушарии были также темнее чем аналогичные пояса в южном почти всегда в эти же годы (1967.1, 1979.1, 1991.8, 1994.6, 2000.7—2002.2, 2005.1, 2007—2009.3, 2010.4—2011.2, 2012.7—2012.9 гг.). Курсивом выделены годы, в которые проявился некоторый дисбаланс в периодичности изменения яркости тропических и умеренных поясов в северном и южном полушариях после 1995 г.

Отметим также, что в момент прохождения афелия орбиты и в максимумах СА зона EZ Юпитера обычно была широкая, светлая и довольно активная. В периоды широких минимумов СА (1964—1966, 1975—1977.5, 1984.7—1987.5, 1995.8—1997.5, 2006—2010.3 гг.), когда активность на Солнце была малой ($R = 0...15$), Юпитер проходил перигелий своей орбиты: это было в 1963.8 г. (перед минимумом СА), 1975.6 г. (в минимуме), 1987.5 г. (в конце минимума), 1998.7 г. (после минимума), 2010.6 г. (после минимума). Практически в эти же или близкие к ним моменты времени усредненная кривая зависимости A_j (штрихпунктир на рисунке) также проходила через минимумы своих значений. При этом светлые тропические и умеренные широтные пояса в южном полушарии (STrZ, STZ) были ярче, чем в северном полушарии в 1963, 1974—1976, 1985—1987, 2000 гг. (кратковременно, ме-

нее года), 2007.2—2008 гг. и в 2010 г. (когда светлым было все южное полушарие) — по 2013.8 г.

То есть, минимальные отношения яркостей северного и южного тропических и умеренных поясов имело место в моменты, когда при лете в северном полушарии Юпитер находился в перигелии на минимальном расстоянии до Солнца (1963.8, 1975.6, 1987.5, 1998.7 и 2010.6 гг.). В это время северное полушарие планеты максимально нагревается Солнцем и становится темнее, тогда как активность Солнца была минимальной. Поэтому основной вклад в изменение притока солнечной энергии в такие моменты давала вытянутость орбиты при прохождении Юпитером ее перигелия.

Существенно «выпадают» из таких квазипериодических изменений только результаты обработки наблюдений, полученных с 1996 по 1999.8 гг., когда вычисленный нами фактор активности был близок к единице вместо ожидаемого его уменьшения с минимумом в конце 1998 г. И лишь в самом конце 1999 г. и до середины 2000 г., в момент, близкий к осеннему для северного полушария равноденствию, фактор активности A_j на несколько месяцев резко уменьшился почти до значения 0.83 (южные широты стали очень светлыми). Но затем его значение восстановилось до предполагаемых значений, и в 2001 г. вычисленные значения A_j стали снова ложиться на усредненную кривую.

Можно отметить особенность, когда в середине 2007 г. значение фактора активности A_j также резко уменьшилось, и на протяжении около двух месяцев достигало значения 0.82. Но уже в начале 2008 г. яркость обоих полушарий стала практически одинаковой; хотя по характеру предполагаемых изменений яркость северных широт должна бы уменьшаться, а южных возрастать. При этом светлая зона NTrZ в 2008.2 г., и особенно в 2009.3 г. была хоть и узкой, но зато самой яркой деталью на диске; и так практически до момента в 2010.3 г. И происходило это в весеннем для северного полушария равноденствии в минимуме СА при индексе $R < 5$ (Солнце все еще мало греет, и к тому же индекс СА незначительный).

С середины 2009 г. северное полушарие стало темнеть преимущественно за счет потемнения в NEB и NTrB. В это время Юпитер прошел весеннее равноденствие и стал приближаться к перигелию при летнем солнцестоянии в северном полушарии в 2010.6 г. На протяжении всего 2010 г. южное полушарие постепенно становилось все светлее, и значение фактора активности достигло ожидаемого минимума со значением $A_j = 0.75$. Это на 10—12 % меньше, чем в исследуемые нами четыре предыдущие моменты минимумов значений A_j . В этот момент все южное полушарие было очень светлое.

Чем выделяются отмеченные моменты? Если в моменты прохождения перигелия и за 1-2 г. до этих моментов в 1963.8, 1975.6 и 1987.5 гг. значение индекса СА было минимальным ($R = 0...15$), то в момент прохождения планетой перигелия в 1998.7 и 2010.6 гг. индекс СА был довольно значительным ($R = 40$ и 20 соответственно). То есть,

в эти моменты, кроме прямого увеличения нагрева всей планеты на 21 % вследствие ее нахождения на ближайшем до Солнца расстоянии, мы, по-видимому, регистрируем и селективное влияние повышающейся активности Солнца, которое будет в этом случае большим для наклоненного к Солнцу северного полушария. Начиная с минимума солнечной активности в 1996—1997.5 гг., Юпитер шел к перигелию с летом в северном полушарии в 1998.7 г. Но северное полушарие не становилось темнее, а южное полушарие не становилось светлее, и до конца 1999.9 г. $A_j \approx 1$. При этом так называемое «фотометрическое количество» темного вещества [25] было практически одинаковым в обоих полушариях. После лета в северном полушарии в 1998.7 г. в 2000—2002 гг. в видимой атмосфере Юпитера происходила перестройка к осеннему равноденствию.

В 1969—1970, 1980—1981 гг. северное полушарие в афелии минимально нагревалось Солнцем и становилось светлее; причем активность Солнца в эти годы была максимальной ($R = 105$ и 155 соответственно). В 1993 г. Юпитер снова находился в афелии орбиты, был наклонен к Солнцу южным полушарием, а Солнце только что прошло самый большой с 1960 г. максимум ($R = 198$). В 2005 г. Юпитер прошел афелий и направился к перигелию в 2010.8 г. После 2004 г. до 2010 г. медленно, от $R \approx 30$ (2004 г.) до $R = 8...0$ (от 2007 до 2010 гг.), уменьшается активность Солнца.

Таким образом, после 1995 г. стало заметным существенное «разбалансирование» в периодичности изменения со временем фактора активности полушарий A_j , солнечной активности и моментов прохождения перигелия и афелия орбиты, тогда как в 1963—1995 гг. корреляция между изменениями фактора A_j , солнечной активностью и моментами прохождения перигелия и афелия орбиты была очень высокой. Это указывает на то, что в 1963—1995 гг. изменение притока солнечной энергии к полушариям планеты из-за вытянутости орбиты и вариаций солнечной активности были синхронны. А после 1995 г. синхронность подвода солнечной энергии к северному и южному полушариям Юпитера из-за изменения солнечной активности и движения планеты по вытянутой орбите нарушилась. Но в это же время уменьшение общего притока солнечной энергии к зимнему северному полушарию существенным образом компенсируется общим притоком энергии от Солнца из-за значительного роста солнечной активности. То есть, несмотря на удаление планеты к афелию орбиты, увеличение индекса солнечной активности приводит к дополнительному нагреванию южного летнего полушария. И если приближение планеты к Солнцу в перигелии приводило к нагреву атмосферы, то минимальная солнечная активность создавала некоторый общий «охлаждающий» эффект.

Воздействие излучения Солнца на атмосферу. Для атмосферы характерным является свойственный ей набор химических превращений и движений. Если внешние воздействия достаточно регулярные, то даже будучи энергетически слабыми, они могут синхронизи-

ровать в ней отдельные активные процессы [29]. Информация о состоянии атмосферы планеты и о происходящих в ней изменениях поступает к нам в широком участке спектра. Формируется это излучение в диапазоне высот, лежащих на несколько десятков километров ниже и выше видимой кромки облачного слоя. Одной из главных внешних причин, влияющих на атмосферу, является количество поступающего излучения от Солнца. При этом следует учитывать реальные изменения солнечной радиации в разных длинах волн со временем, вариации облучения разных широт планеты Солнцем из-за наличия наклона оси вращения планеты к плоскости эклиптики, различие притока солнечной энергии к атмосфере планеты в перигелии и в афелии из-за наличия эксцентриситета орбиты. Во многих случаях хорошо просматривается усиление связи эффектов на Солнце и планете при увеличении интенсивности солнечного излучения и росте СА [19].

Радиация в разных длинах волн проникает к разным слоям атмосферы [1, 72, 77]. Из-за инерционности климатической системы атмосферы долговременное изменение солнечной энергии всего на 0.1 % сможет привести к существенному изменению в видимой атмосфере на временном масштабе десятилетия и более. При изменении солнечного притока на десятые доли процента значимые изменения могут произойти в верхней тропосфере и нижней стратосфере за время от месяца до нескольких лет. А если же облучение резко изменится на 1 % и более, то изменения могут быть заметны уже через несколько дней [11]. При этом происходит солнечно-обусловленное изменение только в верхней атмосфере и затем осуществляется его передача вниз, например, к уровню облаков, как к одному из наглядных индикаторов видимых изменений. Одна из гипотез прямого воздействия опирается на особенности процесса фазовых переходов для разных химических элементов в атмосферах планет (например, воды в атмосфере Земли, метана и аммиака и их производных в атмосфере Юпитера). Поэтому и проявление солнечной активности в атмосферах планет следует искать прежде всего в тех спектральных участках, где проявляется образующаяся в атмосферах планет дымка из активных для данной атмосферы составляющих (гидразин, продукты фотолиза метана, аммиака и пр.). Вполне вероятно, что следует учитывать как сами значения индексов солнечной активности, так и скорость их изменения. Тогда при резких и быстрых изменениях во внешней среде атмосфера не успевает адаптироваться, и вынуждена переключаться в другой режим функционирования [17].

Напомним [3, 6, 83], что интенсивность крайнего ультрафиолета (<100 нм) изменяется более чем вдвое за солнечный цикл. Но это излучение влияет преимущественно на термосферу. Изменения в длинах волн 200—300 нм в зависимости от солнечного цикла достигают до 10—30 %. Это может приводить к изменению в верхней стратосфере содержания некоторых малых активных составляющих на несколько процентов, чему сопутствует уменьшение температуры в области стратопаузы. Поэтому вариации излучения Солнца в диапазоне 170—

390 нм могут связать солнечный цикл с циркуляцией атмосферы [40]. К тому же, если, например, туман в стратосфере по какой-то причине уменьшится, то солнечное УФ-излучение станет глубже проникать в атмосферу планеты. Это приведет к изменению содержания продуктов фотохимических превращений метана CH_4 и аммиака NH_3 , образованию ядер конденсации и сублимации, когда пар, минуя жидкую фазу, может переходить непосредственно в твердую фазу. Так, известно, что в годы максимума солнечной активности в земной атмосфере чаще появляются высотные перистые облака, и частота их появления увеличивается почти на треть [7]. Аналогичная ситуация может наблюдаться и в атмосфере Юпитера, вызывая образование и разрушение тумана из продуктов фотоллиза метана и аммиака.

Связь солнечной активности с процессами в тропосфере должна быть значительно более сложной, чем в случае верхних слоев атмосферы. Хотя, например, для атмосферы Земли было получено [30, 31], что суточная амплитуда изменения давления существенно больше в эпоху максимумов, чем в годы минимумов СА; и в годы с максимумом солнечной активности возрастает число активных циклонов и усиливается общая циркуляция атмосферы. Так, в максимуме четных циклов давление в приполярных областях понижено, а в умеренных широтах — повышено. В максимуме нечетных циклов наблюдается обратное явление: повышение давления в полярной шапке и понижение

в умеренных широтах [8]. Причем данные наблюдений показали, что процессы в верхней тропосфере существенно опережают по времени процессы, происходящие в средней и нижней тропосфере [21]. При этом солнечная активность по отношению к планетной атмосфере выступает, прежде всего, в качестве своеобразного синхронизатора [18] различных физико-атмосферных явлений. И наименее инерционной в этом смысле является магнитосфера, а наиболее инерционной — тропосфера планеты [7, 76].

О времени радиационной релаксации водородно-гелиевой атмосферы. В водородно-гелиевой атмосфере Юпитера метан и аммиак находятся в виде примеси на уровне меньше десятых долей процента [3, 36]. Приток солнечной энергии к атмосфере Юпитера на среднем расстоянии от Солнца примерно в 27 раз меньший, чем к Земле. Из-за значительной удаленности от Солнца Юпитер имеет низкую температуру в фотохимически активных средних областях атмосферы. В сочетании с преобладающим содержанием водорода это приводит к фотохимическим процессам, основными продуктами которых являются сложные углеводороды и аммиак NH_3 [28, 47]. Поэтому цикл солнечной активности и последствия орбитального движения приводят к изменениям количественного и качественного состава атмосферы Юпитера. Результирующие вариации оптической толщины фотохимической дымки опосредованно могут значительно изменять доступ поступающей от Солнца энергии к погодообразующим слоям в атмосфере. В работе [7] мы предложили, что именно таким способом и может осуществляться опосредованное влияние вариаций облучения

планетной атмосферы Солнцем на динамику и общую структуру видимого облачного слоя. Но воздействие солнечного излучения на состояние планетной атмосферы зависит от ее мощности, природы фотохимически активных составляющих, наличия магнитного поля, радиационных поясов и т. п. Все это и приводит к появлению периодичностей разной длительности блеска Юпитера, отражательных характеристик морфологических деталей и отдельных участков на диске. Это связано с изменением расстояния до земного наблюдателя, изменением альбедо планеты из-за переменности ширины и интенсивности темных и светлых облачных образований, с вариациями оптических характеристик атмосферы планеты [3—5, 35, 72—74, 76, 78, 80, 81, 83]. Вариации оптических характеристик атмосферы должны быть отображением различного рода нестабильностей и возмущений кинематических и динамических характеристик.

Теория атмосферной структуры и динамики Юпитера в предположении радиационно-конвективного равновесия показали [67, 69], что режим в видимых слоях облачности в низких широтах, вероятно, вызван инерциальной нестабильностью или вынужденной конвекцией с почти адиабатическим градиентом. Светлые зоны представляют собой регионы с большим давлением и температурой, с повышенной облачностью, а полосы — это регионы с более низким давлением, низкой температурой, нисходящими движениями при относительной безоблачности. То есть, облачный слой в светлых зонах гораздо толще, чем в темных поясах и теплее на одной и той же высоте в атмосфере.

Важной временной постоянной для планетной атмосферы является характерное время радиационной релаксации τ_R [48, 77], за которое атмосфера восстанавливает стабильное состояние после воздействия температурного возмущения $dT/dt = (T_e - T)/\tau_R$, где T_e — температура атмосферы в равновесном состоянии. Расчеты для водородно-гелиевой атмосферы с учетом радиационной непрозрачности гидрокарбонатов показали, что возле уровня тропопаузы $\tau_R \approx 10^8$ с (3.17 г.), экспоненциально уменьшается до 10^5 с (≈ 10 сут) в верхней стратосфере и увеличивается до десятка лет на среднем уровне видимого слоя основной облачности на Юпитере [41, 48, 67, 69].

Наблюдения показывают, что на уровне видимого облачного слоя температура в тропосфере изменяется с высотой по закону, очень близкому к адиабатическому [3, 37, 67, 76, 85]. Поэтому даже незначительные изменения поступления энергии к изучаемому уровню в атмосфере могут привести к изменению адиабатичности температурного градиента атмосферы и даже появлению небольшой сверхадиабатичности, приводящей к образованию заметной вертикальной мелкомасштабной конвекции. Поскольку в конвективное движение вовлекается аммиак с набором фазовых переходов [3], то расчеты показывают, что отмеченный механизм вполне объясняет даже наблюдаемые дневные вариации в изменении поглощения аммиаком и изменение интенсивности водородных квадрупольных линий между западным и восточным лимбами диска Юпитера.

Как земные инфракрасные наблюдения, так и данные с космических миссий «Вояджер-1, -2» в 1978—1979 гг. [86] в момент, близкий к осеннему для северного полушария равноденствию, показали, что на уровнях давления $P = 1 \dots 10$ мбар верхняя стратосфера в северном полушарии через 3 г. после лета все еще была почти на 10 К теплее, чем в южном. То есть, фазовая задержка теплового отклика (на один сезон, примерно 3 г.) совпадает с теоретическим значением времени радиационной релаксации для рассматриваемой высоты в стратосфере Юпитера [37, 51].

Напомним, что атмосферная непрозрачность на длине волны 18 мкм определяется в основном столкновительными процессами и поглощением молекулярным водородом H_2 и практически не подвержена влиянию облаков. Поскольку молекулярный водород равномерно перемешан во всей атмосфере, то наблюдаемые пространственные и временные вариации тепловой эмиссии в данной длине волны отображают истинные вариации атмосферной температуры.

Большинство из отмеченных временных вариаций температуры в диапазоне широт $|60^\circ|$, по нашему мнению, наиболее предпочтительно объяснить сезонными изменениями и значительными вариациями температуры из-за наличия эксцентриситета орбиты. Так, теоретические и модельные исследования [33] дают вполне обнаружимые вариации температуры на некоторых уровнях в атмосфере Юпитера, вызванные сезонным изменением инсоляции разных широтных поясов [37].

В работах [1, 72, 77, 82] мы указывали, что размах колебаний яркости A_j в синем участке спектра почти на 25 % больший, чем в видимом спектральном диапазоне. А соответствующий «узел» равенства яркости полушарий на умеренных и тропических широтах $A_j = 1$ соответствующие данные в синем участке спектра проходят на несколько лет раньше, чем в видимом спектральном диапазоне. Это подтверждает тот факт, что «синяя» часть отраженного облаками Юпитера света формируется несколько выше в атмосфере при меньших значениях давления.

Изменение расстояние до Солнца сказывается сильнее на более глубоких слоях в атмосфере (нижняя и средняя тропосфера), где радиационная временная постоянная значительная (около десятка лет). А солнечная активность сильнее влияет на верхнюю тропосферу и стратосферу, где радиационная постоянная существенно меньшая, и атмосфера откликается на изменение солнечного облучения намного быстрее (единицы лет, месяцы или даже дни). Поэтому совместное воздействие вариаций облучения планеты Солнцем вследствие селективного влияния солнечной активности на разные полушария Юпитера, и значительного (до 21 %) изменения облучения планеты солнечным светом при прохождении перигелия (при лете в северном полушарии) и афелия (при лете в южном полушарии), дает наблюдаемую в видимом свете картину попеременного квазипериодического изменения яркости тропических и умеренных широтных поясов.

Выводы. Таким образом, в нашем исследовании отмечается увеличение яркости то южных, то северных тропических и умеренных областей за один период обращения Юпитера вокруг Солнца. Такое периодическое изменение яркости и усиление активности разных полушарий планеты может указывать на то, что в атмосфере происходит периодическая глобальная перестройка всей системы циркуляции, структуры облачных слоев и надоблачной дымки. Выполненный анализ наблюдательных данных позволяет говорить о связи наблюдаемых вариаций отражательных свойств исследуемых широтных поясов Юпитера с изменением наклона оси вращения планеты и/или его магнитного поля к плоскости ее орбиты, то есть о сезонной перестройке в атмосфере Юпитера. При этом отклик атмосферы на изменение планетоцентрического склонения Солнца происходит не мгновенно, а с существенным запаздыванием.

Сравнение временной зависимости фактора активности полушарий Юпитера в видимом диапазоне спектра с изменением индекса R солнечной активности, показывает, что в период времени с 1962 по 1995 г. эти параметры изменялись практически синхронно, когда в перигелии летнее северное полушарие было темнее зимнего южного; и происходило это при минимальной активности Солнца. После 1995 г. имеющая меньший период изменчивость SA стала «отставать» от орбитальной зависимости, и максимумы солнечной активности с каждым юпитерианским годом приближаются к моменту прохождения Юпитером перигелия орбиты.

В предположении радиационно-конвективного равновесия получено [67, 69], что на одинаковых высотах в атмосфере светлые зоны — это поднимающиеся регионы с большей температурой и повышенной облачностью, а темные более холодные регионы — с опускающимися воздушными массами при относительной безоблачности на тех же уровнях давления. Из этого и из анализа полученных нами наблюдательных данных следует, что более темные умеренные области Юпитера являются холодными областями атмосферы с нисходящими движениями, а светлые умеренные области в каждый конкретный момент на такой же высоте представляют собой относительно более теплые регионы с поднимающимися воздушными массами.

Изменение со временем интегрального блеска Юпитера в визуальном участке спектра, указывает на значительное влияние 22.3-летнего хейловского магнитного цикла солнечной активности на процессы, связанные с наличием наклона оси вращения планеты и его магнитного поля к плоскости орбиты, происходящие в тропосфере на уровне формирования верхней кромки облачной системы.

Сравнение временного хода изменения фактора активности полушарий Юпитера A_j с изменением индекса солнечной активности R и движением планеты по орбите указывает на запаздывание реакции видимого облачного слоя на режим облучения атмосферы Солнцем. Анализ зависимости отражательных характеристик полушарий Юпитера за результатами наблюдений в видимом свете в 1962—1995 гг.

показывает хорошо выраженное запаздывание примерно на 6 лет как реакцию на изменение на 21 % облучения разных полушарий при движении планеты по орбите. Такое значение хорошо совпадает со временем радиационной релаксации водородно-гелиевой атмосферы, полученное в работах [41, 67, 69].

Происшедшее после 1995 г. рассогласование хода временной зависимости фактора активности полушарий Юпитера, индекса активности Солнца и изменения режима облучения Юпитера Солнцем из-за его движения по орбите, можно объяснить несогласованным действием упомянутых причин на атмосферу планеты. Ведь вариации, связанные с влиянием солнечной активности при изменении индекса активности, вызваны значительным изменением УФ-излучения Солнца. И это сможет сказываться сначала только на энергетике верхней надоблачной атмосферы Юпитера и лишь затем опосредованно такие изменения могут передаваться вниз в тропосферу. На это, например, указывают изображения, полученные практически одновременно в видимых лучах и в длинах волн, характерных для полос поглощения метаном в 725 и 890 нм.

1. Видьмаченко А. П. Электрофотометрия Сатурна. I. Распределение яркости вдоль экваториальных областей в спектральном диапазоне 0.3—0.6 мкм // Астрометрия и астрофизика.—1982.—Вып. 47.—С. 70—75.
2. Видьмаченко А. П. Электрофотометрия Сатурна. II. Спектральное распределение яркости вдоль центрального меридиана // Астрометрия и астрофизика.—1984.—Вып. 51.—С. 56—62.
3. Видьмаченко А. П. Планеты-гиганты: теоретические и наблюдательные аспекты // Астрон. вестник.—1991.—25, № 3.—С. 277—292.
4. Видьмаченко А. П. Сезонные изменения отражательных характеристик Сатурна за 4 сатурнианских момента равноденствия // 17 Міжнар. наук. конф. Астрономічна школа молодих вчених. Україна, Житомир, 20—22 травня 2015 р. Програма і тези доповідей. Київ — Житомир, 2015.—С. 10—14.
5. Видьмаченко А. П. Влияние солнечной активности на сезонные изменения метанового поглощения на Сатурне // 17 Міжнар. наук. конф. Астрономічна школа молодих вчених. Україна, Житомир, 20—22 травня 2015 р. Програма і тези доповідей. — Київ — Житомир, 2015.—С. 14—16.
6. Видьмаченко А. П. Сезоны на Сатурне. I. Изменение отражательных характеристик атмосферы в 1964—2012 // Вісник астрон. школи.—2015.—11, № 1.—Р. 37—42.
7. Видьмаченко А. П. Сезоны на Сатурне. II. Влияние солнечной активности на изменение метанового поглощения // Вісник астрон. школи.—2015.—11, № 2.—Р. 133—142.
8. Витинский Ю. И., Оль А. И., Сазонов Б. И. Солнце и атмосфера Земли. — Л.: Гидрометеиздат, 1976.—351 с.
9. Гайсин С. М. Фотоэлектрическая спектрофотометрия Юпитера в 0.32—0.60 мкм // Тр. астрофиз. ин-та АН Каз. ССР.—1979.—№ 35.—С. 35—65.
10. Гаррис Д. Л. Интегральная фотометрия и колориметрия планет и спутников // Планеты и спутники. — М.: Мир, 1967.—С. 241—305.
11. Герман Дж. Р., Голдберг Р. А. Солнце, погода и климат. — Л.: Гидрометеиздат, 1981.—319 с.
12. ДеВокулер Ж. Фотометрия поверхностей планет // Планеты и спутники. — М.:

- Мир, 1975.—С. 267—366.
13. Деметьев М. С., Мороженко А. В. Зоны и полосы диска Юпитера. Различие в вертикальной структуре облачных слоев // Астрон. вестник.—1990.—**24**, № 4.—С. 275—287.
 14. Клименко В. М. Многоцветная фотометрия деталей диска Юпитера. II. Абсолютная отражательная способность // Астрон. вестник.—1980.—**14**, № 3.—С. 148—153.
 15. Клименко В. М. Результаты исследований отражательной способности деталей диска Юпитера в период 1977—1979 гг. // Физика планетных атмосфер. — Киев: Наук. думка, 1981.—С. 63—91.
 16. Кругов В. Д. Временные вариации ультрафиолетового поглощения в непрерывном спектре Юпитера и Сатурна // Астрон. вестник.—1976.—**6**, № 3.—С. 168—171.
 17. Куклин Г. В. Солнце и солнечно-земные связи // Международная геосферно-биосферная программа «глобальные изменения». — М.: Наука, 1989.—Вып. 1.—С. 24—33.
 18. Лоренц Э. Н. Природа и теория общей циркуляции атмосферы. — Л.: Гидрометеоздат, 1973.—260 с.
 19. Мирошниченко Л. И. Солнечная активность и Земля. — М.: Наука, 1981.—144 с.
 20. Мороженко А. В. Зоны и полосы диска Юпитера. Надоблачный слой // Астрон. вестник.—1990.—**24**, № 3.—С. 211—220.
 21. Морской Г. И. О конвекционной теории изменения давления // Метеорология и гидрология.—1967.—№ 1.—С. 123—142.
 22. Рубашев Б. Ш. Проблемы солнечной активности. — М., Л.: Наука, 1964.—563 с.
 23. Саламахина Т. И., Сорокина Л.-П. Факторы активности Юпитера в 1976—1977 гг. // Тр. Астрофиз. ин-та АН Каз ССР.—1979.—№ 35.—С. 66—71.
 24. Смит Б., Хант Дж. Движение и морфология облаков в атмосфере Юпитера // Юпитер. — М.: Мир, 1979.—Т. 2.—С. 433—459.
 25. Сорокина Л. П. Максимальные контрасты на диске Юпитера в 1962—1968 гг. // Астрон. циркуляр.—1973.—№ 749.—С. 4—7.
 26. Тейфель В. Г. Морфология молекулярного поглощения на диске Юпитера // Юпитер. — М.: Мир, 1979.—Т. 2.—С. 292—341.
 27. Фесенков В. Г. Явления, наблюдаемые на Юпитере. Происхождение темных полос // Изв. Астрофиз. ин-та. АН Каз. ССР.—1955.—**1**, № 1-2.—С. 239—251.
 28. Чемберлен Дж. Теория планетных атмосфер: Пер. с англ. — М.: Мир, 1981.—352 с.
 29. Шугрин С. М., Обут А. М. Солнечная активность и биосфера. — Новосибирск: Наука, 1986.—128 с.
 30. Эйгенсон М. С. Очерки физико-географических проявлений солнечной активности. — Львов: Изд-во Львов. ун-та, 1957.—230 с.
 31. Эйгенсон М. С., Гневышев М. Н., Оль А. И., Рубашев Б. М. Солнечная активность и ее земные проявления. — М., Л.: ОГИЗ, 1948.—323 с.
 32. Vanos C. J. Contribution to the study of the Jupiter's atmosphere // Icarus.—1971.—**15**, N 1.—P. 58—67.
 33. Beebe R. F., Orton G. S., West R. A. Time-variable nature of the Jovian cloud properties and thermal structure // Time-variable phenomena in the Jovian system. — Washington: NASA, 1989.—P. 245—296.
 34. Beebe R. F., Suggs R. M., Little T. Seasonal north-south asymmetry in solar radiation incident on Jupiter's atmosphere // Icarus.—1986.—**66**, N 2.—P. 359—365.
 35. Dlugach Zh. M., Morozhenko A. V., Yanovitskiy E. G., Vidmachenko A. P. Investigations of the optical properties of Saturn's atmosphere carried out at the Main astro-

- nomical observatory of the Ukrainian Academy of sciences // *Icarus*.—1983.—**54**, N 2.—P. 319—336.
36. *Drossart P., Courtin R., Atreya S., Tokunaga A.* Variations in the Jovian atmospheric composition and chemistry // *Time-variable phenomena in the Jovian system*. — Washington: NASA, 1989.—P. 344—362.
37. *Flasar F. M.* Temporal behavior of Jupiter's meteorology // *Time-variable phenomena in the Jovian system*. — Washington: NASA, 1989.—P. 324—343.
38. *Focas J. H.* Activity in Jupiter's atmospheric belts between 1904—1963 // *Icarus*.—1971.—**15**, N 1.—P. 56—57.
39. *Focas J. H., Banos C. J.* Photometric study of the atmospheric activity on the planet Jupiter and peculiar activity in the equatorial area // *Ann. Astrophys.*—1964.—**27**.—P. 36—45.
40. *Gallis L. V., Nealy J. E.* Temperature UV variability and its effect on stratospheric thermal structure and trace constituents // *Geophys. Res. Lett.*—1978.—**5**.—P. 249.
41. *Gierasch P. J., Goody R. M.* Radiative time constant in the atmosphere of Jupiter // *J. Atmospheric Sci.*—1969.—**26**.—P. 979—980.
42. *Hall J. S., Rille L. A.* A photometric study of Saturn and its rings // *Icarus*.—1974.—**23**, N 1.—P. 144—156.
43. *Hays D. L., Latham D. A., Hays S.* Measurements of the monochromatic flux from Vega // *Astrophys. J.*—1975.—**197**, N 3.—P. 587—592.
44. *Irvin V. M., Simon T., Menzel D. H.* Multicolor photoelectric photometry of the brighter planets. II. Observation from Le Houga Observatory // *Astron. J.*—1968.—**73**, N 4.—P. 251—264.
45. *Irvin V. M., Simon T., Menzel D. H.* Multicolor photoelectric photometry of the brighter planets. III. Observation from Boyden Observatory // *Astron. J.*—1968.—**73**, N 8.—P. 807—823.
46. *Klimenko V. M., Morozhenko A. V., Vid'machenko A. P.* Phase effect for the brightness coefficient of the central disk of Saturn and features of Jupiter's disk // *Icarus*.—1980.—**42**.—P. 354—357.
47. *Kostiuk T., Espenak F., Mumma M. J., et al.* Variability of methane on Jupiter // *Icarus*.—1982.—**72**, N 2.—P. 394—410.
48. *Kuroda T., Medvedev A. S., Hartogh P.* Parameterization of radiative heating and cooling rates in the stratosphere of Jupiter // *Icarus*.—2014.—**242**.—P. 149—157.
49. *Orton G. S.* Spatially resolved absolute spectral reflectivity of Jupiter: 3390 — 8400 Å // *Icarus*.—1975.—**26**, N 1.—P. 159—174.
50. *Orton G. S., Yanamandra-Fisher P. A., Caldwell J., et al.* Spatial organization and time dependence of Jupiter's tropospheric temperatures, 1980—1993 // *Science*.—1994.—**265**.—P. 625—631.
51. *Ovsak A. S., Teifel V. G., Vid'machenko A. P., Lysenko P. G.* Zonal differences in the vertical structure of the cloud cover of Jupiter from the measurements of the methane absorption bands at 727 and 619 nm // *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*.—2015.—**31**, N 3.—P. 119—130.
52. *Peek B. M.* The planet Jupiter. — London: Faber & Faber, 1958.—456 p.
53. *Pilcher C. B., McCord T. B.* Narrow-band photometry of the bands of Jupiter // *Astrophys. J.*—1971.—**165**.—P. 195—201.
54. *Prinz R.* The atmospheric activity of the planet Jupiter. I. From 1964 to 1968 in yellow light // *Icarus*.—1971.—**15**, N 1.—P. 68—73.
55. *Prinz R.* The atmospheric activity of the planet Jupiter. II. Short-term variations in five spectral ranges // *Icarus*.—1971.—**15**, N 1.—P. 73—79.
56. *Reese E. J.* Jupiter: its Red Spot and other features in 1969—1970 // *Icarus*.—1971.—**14**, N 3.—P. 343—354.

57. *Reese E. J.* Jupiter: its Red Spot and disturbances in 1970—1971 // *Icarus*.— 1972.—**17**, N 1.—P. 57—72.
58. *Reese E. J.* Jupiter's Red Spot in 1968—1969 // *Icarus*.—1970.—**12**, N 2.—P. 249—257.
59. *Reese E. J., Smith B. A.* A rapidly moving spot on Jupiter's north temperate belt // *Icarus*.—1966.—**5**, N 3.—P. 248—257.
60. *Reese E. J., Smith B. A.* Evidence of vorticity in the Great Red Spot of Jupiter // *Icarus*.—1968.—**9**, N 3.—P. 474—486.
61. *Reese E. J., Solberg H. G.* Recent measures of the latitude and longitude of Jupiter's Red Spot // *Icarus*.—1966.—**5**, N 3.—P. 266—273.
62. *Rozenbush V. K., Rspaev F. K., Churyumov K. I., et al.* Variations of the rates of gas and dust production in comet Halley // *Soviet Astron. Lett.*—1989.—**15**, N 2.—P. 155.
63. *Sanchez-Lavega A., Rodrigo R.* Ground-based observations of synoptic cloud systems in southern equatorial to temperate latitudes of Jupiter from 1975 to 1983 // *Astron. and Astrophys.*—1985.—**148**.—P. 67—78.
64. *Solberg H. G.* Jupiter's Red Spot in 1966—1967 // *Icarus*.—1968.—**9**, N 1.—P. 212—216.
65. *Solberg H. G.* A 3-month oscillations in the longitude of Jupiter's red spot // *Planet. and Space Sci.*—1969.—**17**.—P. 1573—1580.
66. *Steklov A. F., Vidmachenko A. P., Miniailo N. F.* Seasonal variations in the atmosphere of Saturn // *Soviet Astron. Lett.*—1983.—**9**, N 2.—P. 135—136.
67. *Stone P. H.* The meteorology of the Jovian atmosphere // *Jupiter: Studies of the interior, atmosphere, magnetosphere and satellites*. — Tucson: Univ. of Arizona Press, 1976.—P. 586—618.
68. *Tejfel V. G., Vdovichenko V. D., Sinyaeva N. V., et al.* Spectrophotometry of zonal cloud structure variations on Jupiter, 1988-1993 // *J. Geophys. Res.*—1994.—**99E**, N 4.—P. 8411—8423.
69. *Trafton L. M., Stone P. H.* Radiative-dynamical equilibrium states for Jupiter // *Astrophys. J.*—1974.—**188**.—P. 649—656.
70. *Vidmachenko A. P.* Absolute electrophotometry of features of Saturn's disc // *Phys. planetary atmospheres*.—1981.—P. 113—132.
71. *Vidmachenko A. P.* Variations in the brightness of celestial objects in astronomical observations mount Maidanak // *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*.—1994.—**10**, N 5.—P. 52—56.
72. *Vidmachenko A. P.* Activity of processes in the atmosphere of Jupiter // *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*.—1985.—**1**, N 5.—P. 101—102.
73. *Vidmachenko A. P.* Reflectivity of Saturn's south equatorial region from 1977 through 1981 // *Solar System Res.*—1985.—**18**, N 3. —P. 123—128.
74. *Vidmachenko A. P.* Some dynamical parameters of the atmosphere of Jupiter // *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*.—1986.—**2**, N 1.—1986.—P. 54—57.
75. *Vidmachenko A. P.* Manifestation of seasonal variations in the atmosphere of Saturn // *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*.—1987.—**3**, N 6.—P. 9—12.
76. *Vidmachenko A. P.* Observable signs of internal waves in Jupiter's atmosphere // *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*.—1988.—**4**, N 4.—P. 40—46.
77. *Vidmachenko A. P.* Temporal changes in methane absorption in Jupiter's atmosphere // *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*.—1997.—**13**, N 6.—P. 21—25.
78. *Vidmachenko A. P.* Seasonal variations in the optical characteristics of Saturn's atmosphere // *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*.—1999.—**15**, N 5.—P. 320—331.
79. *Vidmachenko A. P.* Variations in reflective characteristics of Jupiter's atmosphere // *Solar System Res.*—1999.—**33**.—P. 464—469.

80. *Vidmachenko A. P.* Influence of solar activity on seasonal variations of methane absorption in the atmosphere of Saturn // *Kinematics and Physics of Celestial Bodies.*—2015.—**31**, N 3.—P. 131—140.
81. *Vidmachenko A. P.* Seasonal changes of methane absorption in the Saturn atmosphere // *LPI Contribution.*—2015.—N 1832.—P. 1051.—(46th Lunar and Planetary Science Conference, held March 16–20, 2015 in The Woodlands, Texas).
82. *Vidmachenko A. P.* Solar activity influence on seasonal changes in Saturn's atmosphere // *LPI Contribution.*—2015.—N 1832.—P. 1052.—(46th Lunar and Planetary Science Conference, held March 16–20, 2015 in The Woodlands, Texas).
83. *Vidmachenko A. P.* Seasonal changes on Jupiter. 1. The factor activity of hemispheres // *Kinematics and Physics of Celestial Bodies.*—2016.—**32**, N 4.—P. 48—58.
84. *Vidmachenko A. P., Dlugach Zh. M., Morozhenko A. V.* Nature of the optical nonuniformity in Saturn's disk // *Solar System Res.*—1984.—**17**, N 4.—P. 164—171.
85. *Vidmachenko A. P., Steklov A. F., Minyailo N. F.* Seasonal activity on Jupiter // *Soviet Astron. Lett.*—1984.—**10**, Sept.-Oct.—P. 289—290.
86. *Voyager* encounters Jupiter. — Pasadena, California: NASA, 1979.—40 p.
87. *Wagener R., Caldwell J.* Strong north/south asymmetry in the Jovian atmosphere // *Icarus.*—1988.—**74**, N 1.—P. 141—152.
88. *West R. A.* Spatially resolved methane band photometry of Jupiter. I. Analysis of the south equatorial belt and the south tropical zone reflectivity // *Icarus.*—1979.—**38**, N 1.—P. 34—53.

Статья поступила в редакцию 15.10.15

УДК 523.45–852

А. В. Мороженко, А. С. Овсак

Главная астрономическая обсерватория Национальной академии наук Украины
ул. Академика Заболотного 27, Киев, 03680

О возможности определения мнимой части комплексного показателя преломления аэрозольных частиц в отдельном высотном облачном слое атмосферы Юпитера

Предложен метод для определения значения мнимой части n_i комплексного показателя преломления аэрозольных частиц, формирующих облачный слой, расположенный на определенном высотном участке атмосферы планеты-гиганта. По данным спектральных измерений геометрического альbedo Юпитера (1993 г.) выполнены расчеты величины n_i для всего атмосферного столба и для расположенного в диапазоне давления 0.52...0.78 бар облачного слоя, вероятно сформированного гидросульфидами аммония. Значения n_i , полученные для облачного слоя и для всего атмосферного столба, существенно различаются: 0.00098 и 0.00012 соответственно.

ПРО МОЖЛИВІСТЬ ВИЗНАЧЕННЯ УЯВНОЇ ЧАСТИНИ КОМПЛЕКСНОГО ПОКАЗНИКА ЗАЛОМЛЕННЯ АЕРОЗОЛЬНИХ ЧАСТИНОК У ОКРЕМОМУ ВИСОТНОМУ ХМАРОВОМУ ШАРІ АТМОСФЕРИ ЮПІТЕРА, Мороженко О. В., Овсак О. С. — Запропоновано метод для визначення значення уявної частини n_i комплексного показника заломлення аерозольних частинок, які формують хмаровий шар, розташований на визначеній висотній ділянці атмосфери планети-гіганта. За даними спектральних вимірювань геометричного альbedo Юпітера (1993 р.) виконано обчислення величини n_i для всього атмосферного стовпа і для розміщеного у діапазоні тиску 0.52...0.78 бар хмарового шару, ймовірно сформованого гідросульфiдами амонію. Значення n_i , отримані для хмарового шару і для усього атмосферного стовпа, суттєво розрізняються: 0.00098 і 0.00012 відповідно.

ON THE POSSIBILITY OF DETERMINING THE VALUE OF THE IMAGINARY PART OF THE COMPLEX REFRACTIVE INDEX OF AEROSOL PARTICLES IN A SEPARATE ALTITUDINAL CLOUDY

LAYER OF JUPITER'S ATMOSPHERE, by Morozhenko A. V., Ovsak A. S. — The method for determining of value the imaginary part n_i of the complex refractive index of aerosol particles, they forms a cloudy layer, which lays in a particular altitudes level of giant planet's atmosphere, was been developed. We have calculated the value of n_i for both the whole atmospheric column and for the separate cloudy layer with using of spectral data of geometric albedo of Jupiter in 1993. The mentioned cloudy layer has a pressure range of 0.52—0.78 bars and may be compose of hydrosulfide ammonium. The values of n_i obtained for the cloud layer and for the entire atmospheric column differ quite substantially: 0.00098 and 0.00012, respectively.

ВВЕДЕНИЕ

Согласно современным представлениям о вероятной вертикальной структуре облачного покрова атмосферы Юпитера, основой которых являются работы [12, 24] по термодинамическому моделированию процесса образования облаков в атмосферах планет-гигантов, ниже стратосферной оптически тонкой дымки (см., например, [23]) на различных высотах могут располагаться несколько облачных слоев различной природы [8, 13, 25]. Верхний слой составляют частицы замерзшего аммиака. Ниже находятся два слоя: из частиц гидросульфидов аммония и, вероятно, из смеси кристалликов воды и капель жидкого аммиака. Высотное положение и мощность этих слоев весьма чувствительны к используемому при моделировании количественному содержанию химических элементов в атмосфере Юпитера (рис. 1).

Наличие многослойной структуры у облачного покрова Юпитера подтверждено результатами нефелометрического эксперимента при спуске зонда КА «Галилео» [17], а также оценками вертикальной

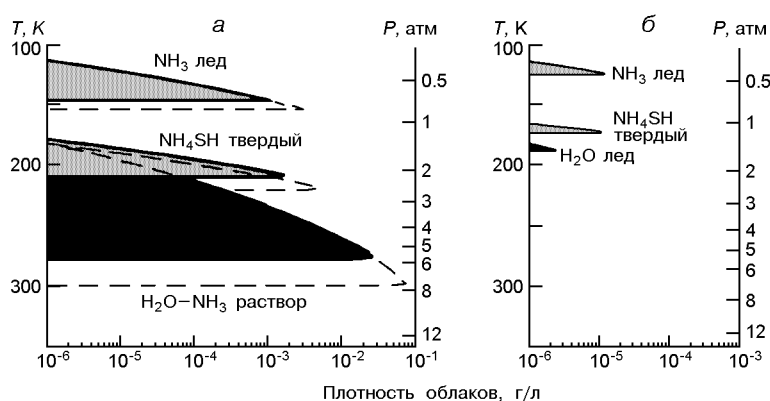


Рис. 1. Модели облаков Юпитера: *a* — полученная в предположении количества аммиака, сероводорода и воды, соответствующих содержанию азота, серы и кислорода в солнечном веществе (жирные черные линии) и утроенному содержанию этих элементов (пунктирные линии), *б* — модель облаков в «сухой атмосфере», рассчитанная по данным измерений количества веществ масс-спектрометром зонда КА «Галилео» [9]

структуры объемного коэффициента рассеяния a_a аэрозоля, основанными на анализе данных спектрофотометрических измерений интегрального диска Юпитера [20] и его отдельных широтных участков [7]. Следует отметить, что полученная в работе [20] вертикальная структура облаков близка к результатам термодинамического моделирования, полученным с использованием данных измерений зондом КА «Галилео» количественного содержания веществ в так называемой «горячей точке» атмосферы планеты-гиганта [17] (рис. 1, б).

Поскольку аммиак и вода, не содержащие примесей других веществ, практически не поглощают свет в непрерывном спектре, то можно предположить, что наблюдаемое в атмосфере Юпитера поглощение главным образом обусловлено ее гидросульфид-аммониевым слоем. В то же время имеющиеся на сегодня оценки спектральных значений величины мнимой части n_i комплексного показателя преломления аэрозольных частиц в атмосфере Юпитера [6, 9, 10, 14, 15] характеризуют величины, усредненные для всего многослойного атмосферного столба.

Дело в том, что для этих оценок использовались полученные непосредственно из наблюдательных данных значения альбеда однократного рассеяния аэрозоля

$$a = \frac{\frac{a}{s}}{\frac{a}{s} + \frac{a}{s}}, \quad (1)$$

где $\frac{a}{s}$, — усредненные по всем облачным слоям объемные коэффициенты рассеяния и поглощения аэрозольных частиц, а $\frac{a}{s}$, — суммы рассеивательной и поглощательной составляющих оптической толщины всех аэрозольных слоев. В модели, когда основной вклад в поглощение света атмосферным столбом вносит лишь поглощательная составляющая HS гидросульфид-аммониевого слоя, величина HS , а выражение (1) для этого слоя приобретает вид

$$\frac{^{HS}}{a} = \frac{\frac{a}{s^{HS}}}{\frac{a}{s^{HS}} + \frac{a}{s^{HS}}}, \quad (2)$$

где $\frac{a}{s^{HS}}$ — аэрозольная рассеивательная составляющая его оптической толщины.

Целью настоящей работы является разработка метода расчета величины $\frac{^{HS}}{a}$ для отдельного облачного слоя в атмосфере Юпитера и определение значения мнимой части n_i^{HS} показателя преломления у его аэрозольных частиц.

МЕТОД АНАЛИЗА И ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Определение вертикальной структуры облачных слоев в атмосфере планеты-гиганта выполнялось с использованием метода, основанного на использовании величины эффективной оптической глубины [1—4, 19, 21, 22]. Значение величины n_i аэрозольных частиц в выделенном

облачном слое и ее значение, усредненное для всей толщи атмосферного столба, были рассчитаны по спектральным значениям геометрического альbedo Юпитера, полученным в 1993 г. в полосах поглощения метана с центрами на $\lambda = 619, 727$ и 887 нм [11]. Поскольку методика анализа исходных данных и аналитические формулы для вычисления необходимых физических величин, а также описание специально разработанного комплекса компьютерных программных кодов подробно даны в работах [15, 18, 20], то здесь мы только отметим следующее.

Как и в перечисленных работах, при решении обратной задачи атмосферной оптики использовалась следующая модель полидисперсной аэрозольной среды: действительная часть показателя преломления $n_r = 1.36$, эффективный радиус частиц $r_{\text{эф}} = 0.4$ мкм и дисперсия размеров $\sigma_{\text{эф}} = 0.35$ для модифицированного гамма-распределения частиц по размерам [14, 16]. Поглощение в непрерывном спектре учитывалось по методике, предложенной в работе [15]. Полученные нами при модельных расчетах графические зависимости от давления величин $\alpha_a(P)$ и $\alpha_s(P)$, характеризующие усредненные свойства всех облачных слоев атмосферного столба, показаны на рис. 2 и 3 соответственно. На зависимости $\alpha_a(P)$ видны разрывы между разнесенными по высоте облачными слоями, представленные участками с уменьшенными или постоянными значениями величины α_a . Аналогичная картина ранее была получена в работе [19] для зависимости от давления относительной концентрации аэрозольных частиц $\alpha_s(P)/\alpha_g(P)$ (здесь α_g — газовая рассеивательная составляющая оптической глубины). В то же время значения величины α_s постепенно увеличиваются с увеличением давления, а значит с глубиной в атмосфере (рис. 3).

Высотное расположение и протяженность аэрозольных слоев в верхней части атмосферы Юпитера (рис. 2) можно сопоставить с вертикальной структурой облаков планеты-гиганта, полученной из результатов термодинамического моделирования (рис. 1). В результате верхние аэрозольные слои 1 и 2 на рис. 2 мы отождествили как «дымка» и верхнее аммиачное облако. Тогда слой 3 сформирован частицами гидросульфидов аммония, а слой 4 — это вероятная смесь частиц замерзшей воды и каплеобразного аммиака. Тогда из зависимости $\alpha_a(P)$ (рис. 2) определяется диапазон давления, в котором расположен гидросульфид-аммониевый слой: $P = 0.52 \dots 0.78$ бар, а по нему с помощью зависимости $\alpha_s(P)$ (см. обозначение штриховыми линиями на рис. 3), рассчитывается величина аэрозольной рассеивающей составляющей оптической толщины α_{sHS} слоя.

Полученные значения величин α_{sHS} и α_{HS} , с помощью выражения (2), позволяют рассчитать величину альbedo рассеяния аэрозольных частиц, и согласно методике [15] определить значение величины n_i в интересующем нас облачном слое.

В таблице приведены значения величин, рассчитанные нами для гидросульфид-аммониевого слоя и для всего атмосферного столба:

Рис. 2. Зависимость от давления объемного коэффициента рассеяния аэрозоля σ_a в верхних слоях атмосферы Юпитера [20]. Облачные слои пронумерованы в порядке увеличения глубины их расположения в атмосфере. Стрелками указано положение прослоек

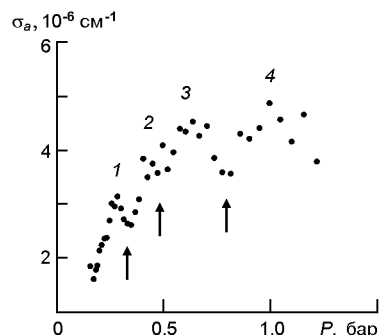
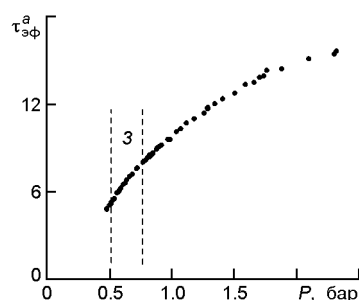


Рис. 3. Зависимость приведенной к длине волны $\lambda = 887.2$ нм величины $\tau_{эф}^a$ от давления P , рассчитанная в полосе поглощения метана на $\lambda = 727$ нм. Вертикальными линиями выделен исследуемый высотный участок 3 атмосферы Юпитера в диапазоне давления 0.52...0.78 бар



Значения параметров, рассчитанные для отдельного облачного слоя и для всего атмосферного столба

Высотная область		σ_s^a	σ_a	n_i
Гидросульфид-аммониевый слой	0.024	3.3	0.993	0.00098
Атмосферный столб	0.024	23.83	0.999	0.00012

поглощательная в непрерывном спектре и рассеивательная аэрозольные составляющие оптической толщины слоя σ_s^a и альbedo рассеяния аэрозольных частиц σ_a , мнимая часть n_i комплексного показателя преломления аэрозольных частиц. Видно, что значение n_i , рассчитанное для отдельного облачного слоя, почти на порядок больше этой величины для всего атмосферного столба.

ВЫВОДЫ

Предложенный метод определения мнимой части комплексного показателя преломления аэрозольных частиц, формирующих облачный слой в определенном высотном участке атмосферы планеты-гиганта, базируется на методике расчета величины n_i для всей толщи атмосферного столба.

Поэтому, к сожалению, ему присущи все недостатки и погрешности расчетов указанной методики, детально рассмотренные в работах [5, 15]. В дополнение к ним отсутствие достоверных данных об истинной природе и высотном расположении облачных слоев в атмосфере Юпитера не позволяет выполнить однозначную привязку высотной структуры объемного коэффициента рассеяния аэрозоля, получаемую

из анализа спектрофотометрических данных. Поэтому предложенный метод определения величины n_i аэрозольных частиц в отдельном облачном слое можно рассматривать как способ экспресс-сравнения характеристик облачного покрова на отдельных участках атмосферы планеты-гиганта или использовать его для анализа свойств отдельных высотных облачных слоев с привлечением усредненных по всему диску данных.

1. *Мороженко А. В.* О структуре облачного слоя Юпитера // Письма в астроном. журн.—1984.—**10**, № 10.—С. 775—779.
2. *Мороженко А. В.* Вертикальная структура широтных облачных поясов Юпитера // Астрон. вестн.—1985.—**19**, № 1.—С. 64—76.
3. *Мороженко А. В.* Проблемы изучения вертикальных структур облачных слоев атмосфер планет-гигантов // Кинематика и физика небес. тел.—1993.—**9**, № 1.—С. 3—26.
4. *Мороженко А. В.* Различие вертикальных структур облачных слоев атмосфер планет-гигантов // Кинематика и физика небес. тел.—2001.—**17**, № 3.—С. 261—278.
5. *Мороженко А. В., Овсак А. С., Видьмаченко А. П., Тейфель В. Г., Лысенко П. Г.* Мнимая часть показателя преломления аэрозоля в широтных поясах диска Юпитера // Кинематика и физика небес. тел.—2016.—**32**, № 1.—С. 43—55.
6. *Мороженко А. В., Яновицкий Э. Г.* Параметры оптической модели атмосферы Юпитера для непрерывного спектра в области 0.35—0.92 мкм // Письма в астроном. журн.—1976.—**2**, № 1.—С. 50—54.
7. *Овсак А. С., Тейфель В. Г., Лысенко П. Г.* Вертикальная структура объемного коэффициента рассеяния аэрозоля в широтных полосах диска Юпитера // Кинематика и физика небес. тел.—2016.—**32**, № 4.—С. 36—47.
8. *Atreya S. K., Wonga A. S., Baines K. H., Wongc M. H., Owen T. C.* Jupiter's ammonia clouds — localized or ubiquitous? // Planet. and Space Sci.—2005.—**53**.—P. 498—507.
9. *Dlugach Z. M., Mischenko M. I.* The effect of aerosol shape in retrieving optical properties of cloud particles in the planetary atmospheres from the photopolarimetric data. Jupiter // Sol. Syst. Res.—2005.—**32**.—P. 102—111.
10. *Dlugach Z. M., Mischenko M. I.* Photopolarimetry of planetary atmospheres: what observational data are essential for a unique retrieval of aerosol microphysics? // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.—2008.—**384**.—P. 64—70.
11. *Karkoschka E.* Spectrophotometry of the Jovian planets and Titan at 300 to 1000 nm wavelength: The methane spectrum // Icarus.—1994.—**111**, N 3.—P. 967—982.
12. *Lewis J. S.* The clouds of the Jupiter and the NH₃—H₂O and NH₃—H₂S systems // Icarus.—1969.—**10**, N 2.—С. 365—378.
13. *Matcheva K. I., Conrath B. J., Gierasch P. J., Flasar F. M.* The cloud structure of the Jovian atmosphere as seen by the Cassini/CIRS experiment // Icarus.—2005.—**179**, N 2.—P. 432—448.
14. *Mishchenko M. I.* Physical properties of the upper troposphere aerosols in the equatorial region of Jupiter // Icarus.—1990.—**84**, N 2.—P. 296—304.
15. *Morozhenko A. V., Ovsak A. S.* On the possibility of separation of aerosol and methane absorption in the long-wavelength spectral range for giant planets // Kinematics and Physics of Celestial Bodies.—2015.—**31**, N 5.—P. 225—231.

16. *Morozhenko A. V., Yanovitskij E. G.* The optical properties of Venus and Jovian planets. I. The atmosphere of Jupiter according to polarimetric observations // *Icarus*.—1973.—**18**, N 4.—P. 583—592.
17. *Niemann H. B., Atrea S. K., Carignan G. R., et al.* The composition of the Jovian atmosphere as determined by the Galileo probe mass spectrometer // *J. Geophys. Res.*—1998.—**103**, N E10.—P. 22831—22845.
18. *Ovsak A. S.* Upgraded technique to analyze the vertical structure of the aerosol component of the atmospheres of giant planets // *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*.—2013.—**29**, N 6.—P. 291—300.
19. *Ovsak A. S.* Changes in the characteristics of the upper layers of the jovian atmosphere from the data on the integral observations of the planetary disk // *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*.—2015.—**31**, N 1.—P. 25—32.
20. *Ovsak A. S.* Variations of the volume scattering coefficient of aerosol in the jovian atmosphere from observations of the planetary disk // *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*.—2015.—**31**, N4.—P. 197—204.
21. *Ovsak A. S.* Vertical structure of cloud layers in the atmospheres of giant planets. I. On the influence of variations of some atmospheric parameters on the vertical structure characteristics // *Solar Syst. Res.*—2015.—**49**, N 1.—P. 46—53.
22. *Ovsak A. S., Teifel' V. G., Vid'machenko A. P., Lysenko P. G.* Zonal differences in the vertical structure of the cloud cover of Jupiter from the measurements of the Methane absorption bands at 727 and 619 nm // *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*.—2015.—**31**, N3.—P. 119—130.
23. *Simon-Miller A. A., Banfield D., Gierasch P. J.* Color and the Vertical Structure in Jupiter's Belts, Zones, and Weather Systems // *Icarus*.—2001.—**154**, N2.—P. 459—474.
24. *Weidenschilling S. J., Lewis L. S.* Atmospheric and cloud structures of the jovian planets // *Icarus*.—1973.—**20**, N 3.—P. 465—476.
25. *West R. A., Tomasko M. G.* Spatially resolved methane band photometry of Jupiter. III: Cloud vertical structures for several axisymmetric bands and the GRS // *Icarus*.—1980.—**41**.— P. 278—292.

Статья поступила в редакцию 26.05.16

УДК 523.9, 523.982

У. М. Лейко

Астрономическая обсерватория
Киевского национального университета имени Тараса Шевченко
ул. Обсерваторная 3, Киев-53, 04053
leikoum@ukr.net

Вариации магнитной асимметрии Солнца

Представлены результаты исследования северо-южной асимметрии солнечной активности и солнечных магнитных полей. Для исследования использованы временные ряды крупномасштабного магнитного поля Солнца как звезды и полярного магнитного поля Солнца (1975—2015 гг., <http://wso.stanford.edu>), площади солнечных пятен (1875—2015 гг., <http://solarscience.msfc.nasa.gov/greenwch.shtml>). На основе анализа кумулятивной суммы временных рядов северо-южной асимметрии площади солнечных пятен выделен долговременный цикл северо-южной асимметрии солнечной активности (мелкомасштабных магнитных полей, тороидального компонента) длительностью около 140 лет. Сравнительный анализ вариаций кумулятивных сумм рядов суточных значений общего магнитного поля Солнца как звезды и асимметрии суточных значений площади солнечных пятен на временном интервале 1975—2015 гг. показал, что крупномасштабное магнитное поле Солнца возможно также имеет такой долговременный цикл. Вариации асимметрии крупномасштабных и мелкомасштабных полей Солнца до 2005.5 г. происходили синхронно, после этого момента — в противофазе.

ВАРІАЦІЇ МАГНІТНОЇ АСИМЕТРІЇ СОНЦЯ, Лейко У. М. — Приводяться результати дослідження асиметрії сонячної активності та сонячних магнітних полів. Для дослідження використано часові ряди великомасштабного магнітного поля Сонця як зірки і полярного магнітного поля Сонця (1975—2015 pp., <http://wso.stanford.edu>), площі сонячних плям (1875—2015 pp., <http://solarscience.msfc.nasa.gov/greenwch.shtml>). На основі аналізу кумулятивної суми часових рядів північно-південної асиметрії площі сонячних плям виділено довготривалий цикл асиметрії сонячної активності (локальних магнітних полів, тороїдального компонента магнітного поля Сонця) тривалістю близько 140 років. Можливо, великомасштабне магнітне поле також

має такий довготривалий цикл. Порівняльний аналіз варіацій кумулятивних сум рядів добових значень загального магнітного поля Сонця і площі сонячних плям для інтервалу 1975—2015 рр. виявив, що варіації асиметрії великомасштабних і локальних магнітних полів Сонця відбувалися синхронно до 2005.5 р., а після цього моменту — в антифазі.

CHANGES OF SUN MAGNETIC ASYMMETRY, by Leiko U. M. — We report the results of the analysis of the north-south asymmetry of solar activity, solar magnetic fields. The analysis is based on solar mean magnetic field and solar polar magnetic field time series, 1975—2015 (<http://wso.stanford.edu>), the Greenwich sunspot data, 1875—2015 (<http://solarscience.msfc.nasa.gov/greenwch.shtml>). The long-term cycle (~ 140 years) of north-south asymmetry of solar activity was selected on the time series of the sunspot area. Probably the photospheric large-scale magnetic fields have this long-term cycle also. Variations of the asymmetry of large-scale and small-scale magnetic fields (area of sunspots) are in sync until 2005.5, after this time the dynamics asymmetry passes in antiphase.

ВВЕДЕНИЕ

Солнечная активность — это разнообразные явления и процессы, связанные с образованием и распадом в солнечной атмосфере магнитных полей. Наиболее изученный вид солнечной активности — изменение числа солнечных пятен, телескопические наблюдения которых впервые были начаты в 1610 г. Г. Галилеем. Несмотря на то что физическая природа пятен оставалась неясной вплоть до XX века, наблюдения продолжались, и к XIX веку уже имелся достаточно продолжительный ряд наблюдений числа пятен. В 1843 г. Г. Швабе установил цикличность солнечной активности, а в 1848 г. Р. Вольф ввел индикатор солнечной активности — число Вольфа. На сегодняшний день известно, что помимо основной гармонике в 11 лет числа Вольфа имеют долгопериодическую составляющую около 80—90 лет (цикл Глейсберга). Благодаря радиоизотопным данным удалось выделить цикличность с периодом примерно 205 лет (цикл Зюйса). Помимо чисел Вольфа имеется индекс, характеризующий занимаемую пятнами площадь. Этот ряд начинается с 1874 г. С помощью этих данных можно получить информацию об уровне солнечной активности по полушариям, асимметрии солнечной активности.

В 1908 г. Г. Хейлом было установлено наличие магнитных полей в солнечных пятнах [11], а позже было обнаружено, что в течение каждого 11-летнего цикла все ведущие пятна биполярных групп имеют одинаковую полярность в северном полушарии и противоположную — в южном [12]. В последующем же цикле полярность магнитного поля пятен изменяется на противоположную как в северном, так и в южном полушариях (закон полярности Хейла). Таким образом, физическим циклом солнечной активности следует считать 22-летний цикл.

Кроме сильных полей в пятнах, на Солнце наблюдается слабое поле дипольного (полоидального) типа величиной порядка 1 мТл. В 1959 г. Х. Бэбкок [5, 6] установил, что это поле также изменяет свою полярность от цикла к циклу, и происходит это во время максимумов 11-летнего цикла солнечной активности. Таким образом, сложную структуру развертывания солнечной активности на большой временной шкале определяет суперпозиция многих циклов.

Отличительной чертой солнечной активности является наличие асимметрии относительно северного и южного полушарий. Еще в конце XIX века Шперер и Маундер указали на асимметрию пятнообразовательной деятельности. Впервые детально это явление было исследовано в работе [14]. Позже было обнаружено, что асимметрия характерна для широкого спектра процессов солнечной активности, например для количества и длительности солнечных вспышек [15], вращения фотосферного магнитного поля [4, 16] и т. д. Важное место в исследовании асимметрии солнечной активности занимает поиск периодичностей и их анализ, что важно для установления природы этого явления. Для исследования особенностей асимметрии солнечной активности применялись различные статистические методы [8, 9], вейвлет-анализ [7, 10], анализ кумулятивной суммы временного ряда [2, 3]. Сейчас понятно, что асимметрия носит не случайный характер, а наблюдается на длительных промежутках времени. Многие детали (разнообразия) протекания солнечной активности, а также асимметрии подробно рассмотрены в работе [13].

В представленной работе, которая является продолжением исследований работы [2], изложены результаты исследования особенностей асимметрии солнечной активности, полученные в результате анализа кумулятивной суммы временных рядов некоторых индексов солнечной активности. На примере анализа кумулятивной суммы временного ряда полярного магнитного поля Солнца (1975—2015 гг.) обосновывается применение анализа кумулятивной суммы временного ряда для поиска длительных (долговременных) периодичностей. Посредством анализа временного хода кумулятивной суммы ряда среднемесячных значений площади солнечных пятен (1875—2015 гг.) исследуются долговременные изменения асимметрии солнечной активности. Проведен сравнительный анализ хода кумулятивных сумм временных рядов суточных значений общего магнитного поля Солнца (ОМПС) и суточных значений площади солнечных пятен для интервала 1975—2015 гг.

НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

В работе использованы временные ряды среднемесячных и суточных значений площади солнечных пятен по полушариям (A_N , A_S), ряды суточных значений H_0 общего магнитного поля Солнца (ОМПС) и ряды полярного магнитного поля Солнца (H_N , H_S).

Солнечные пятна являются наиболее ярким проявлением магнитных локальных полей. Суммарная по диску площадь пятен пропорциональна полному магнитному потоку пятен. Данные о солнечных пятнах (относительные числа Вольфа, площади солнечных пятен) публикуются на сайте <http://solarscience.msfc.nasa.gov/greenwch.shtml>.

Полярные магнитные поля H_N и H_S Солнца и общее магнитное поле H_0 Солнца (ОМПС) наблюдаются в обсерватории имени Вилкокка с 1976 г. (<http://wso.stanford.edu>). Полярные магнитные поля представляют собой усредненные высокоширотные приполярные поля, относящиеся к гелиоширотам выше $\pm 55^\circ$. Полярные магнитные поля максимальны вблизи минимумов солнечной активности и минимальны — вблизи максимумов (рис. 1). Изменения знака полярного магнитного поля происходят в эпоху максимума солнечного цикла. Эти изменения в северном и южном полушариях не совпадают во времени.

Общее магнитное поле Солнца H_0 , которое характеризует магнитное поле Солнца как звезды, является интегрированным по видимому диску Солнца значением лучевой составляющей фотосферного магнитного поля. Величина H_0 пропорциональна магнитному потоку

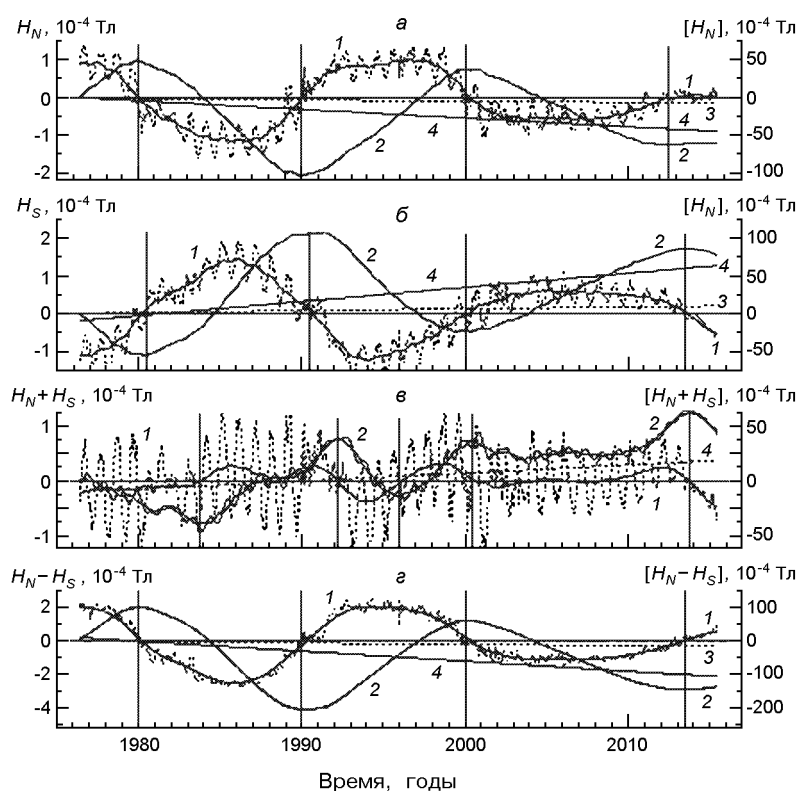


Рис. 1. Изменение со временем значений H_N и H_S полярного магнитного поля Солнца северного и южного полюсов, их суммы $H_N + H_S$ и разности $H_N - H_S$ (пунктирные кривые, шкала слева). Сплошные тонкие линии — скользящее среднее, штриховые прямые — линейный тренд. Жирные линии — соответствующие кумулятивные суммы этих величин (шкала справа). Сплошные тонкие прямые — линейный тренд кумулятивных сумм

видимого диска Солнца, т. е. разности фотосферных магнитных полей положительной и отрицательной полярностей (асимметрии). На сайте обсерватории выставлен ряд суточных значений ОМПС (см. рис. 5, а).

Для исследования нами был использован анализ кумулятивной суммы временных рядов выбранных нами индексов солнечной активности. Кумулятивная функция суммирует текущее значение анализируемого ряда со всеми предшествующими, усредняет короткопериодические изменения и выявляет долговременные: если кумулятивная сумма возрастает, то доминируют положительные значения, если убывает — отрицательные.

Свойства кумулятивной суммы хорошо демонстрирует ряд полярного магнитного поля Солнца. На рис. 1 пунктирными линиями 1 показано изменение со временем значений полярного магнитного поля отдельно для северного и южного полюсов (H_N , H_S), их сумма $H_N + H_S$ и разность $H_N - H_S$, тонкими сплошными линиями — их сглаженные значения, штриховыми прямыми — тренды. Жирными сплошными линиями 2 показаны соответствующие кумулятивные суммы $[H_N]$, $[H_S]$, $[H_N + H_S]$, $[H_N - H_S]$. (Здесь и далее кумулятивная сумма величины будет обозначаться заключением ее в квадратные скобки). Прямые сплошные линии — линейные тренды кумулятивных сумм. Сплошные вертикальные линии обозначают моменты изменения знака полярного магнитного поля на N- и S-полюсах. Четко видно, что моменты изменения знака магнитного полярного поля на всех четырех панелях соответствуют экстремумам кумулятивной суммы.

Графики кумулятивных сумм $[H_N]$ и $[H_S]$ (рис. 1, а, б) имеют синусоидальный вид с двумя максимумами и двумя минимумами. Затяжной минимум 24-го цикла и его низкая активность также отразились на ходе кривых кумулятивных сумм. Расстояние между двумя максимумами и двумя минимумами равно 20...22 г. Фазы роста и спада длятся около 11 лет. Максимумы кумулятивной суммы поля северного полюса совпадают с максимумами нечетных циклов чисел Вольфа, южного полушария — с максимумами четных циклов. Таким образом, период кумулятивной суммы магнитного поля на каждом из полюсов соответствует магнитному циклу Хейла, а ветви роста и спада — 11-летнему циклу солнечной активности.

Кривые на рис. 1, в имеют сложную форму. Кумулятивная сумма $[H_N + H_S]$ имеет пять экстремумов и плато длительностью около 10 лет (2002—2012 гг.). Расположение экстремумов хаотично, не совпадает с экстремумами кумулятивных кривых по отдельным полюсам. Плато, как видно из рис. 1, в, соответствует интервалу времени, в течение которого полярные поля на обоих полюсах были приблизительно равны по модулю (кривая сглаженных значений суммарного полярного поля имеет приблизительно нулевое значение).

Как видно из рис. 1, сдвиг по фазе магнитных полей на северном и южном полюсах составляет около 11 лет. Поэтому кривая кумулятив-

ной суммы $[H_N + H_S]$ имеет такую сложную форму, так как она является суммой кумулятивных сумм $[H_N]$ и $[H_S]$ (рис. 1, а, б). На рис. 1, г приведена разница $H_N - H_S$ полей северного и южного полюсов. По сути это сумма полей, сдвинутых по фазе на 11 лет. Как видно, кумулятивная сумма $[H_N - H_S]$ соответствует кумулятивной сумме поля северного полюса. (Кумулятивная сумма разницы $[H_S - H_N]$ соответствовала бы кумулятивной сумме $[H_S]$ поля южного полюса).

Небольшие линейные тренды на всех панелях скорее всего обусловлены аномально малыми значениями магнитного полярного поля в 24-м цикле.

Мы исследовали влияние фазового сдвига между полями на северном и южном полюсах на кумулятивную сумму. С этой целью сдвигался временной ряд поля южного полюса относительно временного ряда магнитного поля северного полюса, поля суммировались и на общем временном интервале строилась кумулятивная сумма результирующего ряда. Чем больше сдвиг, тем короче общий временной интервал.

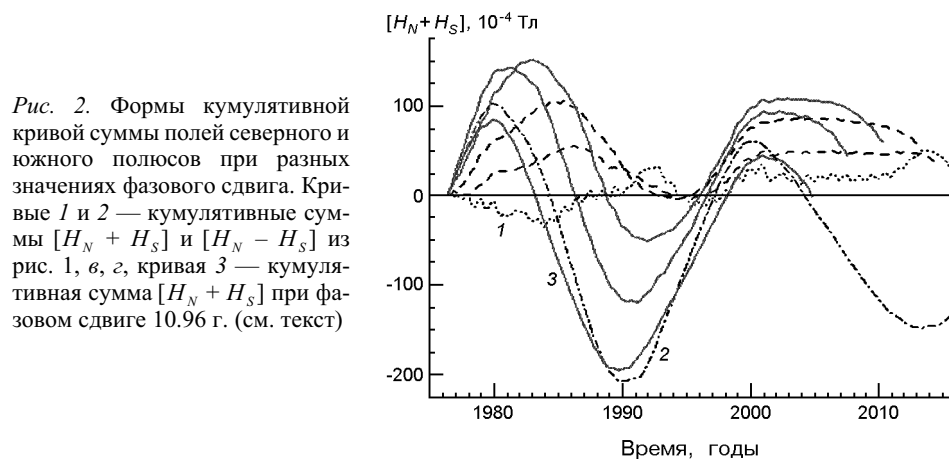


Рис. 2. Формы кумулятивной кривой суммы полей северного и южного полюсов при разных значениях фазового сдвига. Кривые 1 и 2 — кумулятивные суммы $[H_N + H_S]$ и $[H_N - H_S]$ из рис. 1, в, г, кривая 3 — кумулятивная сумма $[H_N + H_S]$ при фазовом сдвиге 10.96 г. (см. текст)

На рис. 2 приведены кумулятивные суммы $[H_N + H_S]$ для разных сдвигов по фазе полей на северном и южном полюсах. Кривые 1 и 2 — это кумулятивные суммы, приведенные на рис. 1, в, г. Остальные линии различной длины — кумулятивные кривые суммы полей двух полюсов, сдвинутых по фазам: 500, 1000, 2000, 3000, 4000 сут, или 1.37, 2.74, 5.50, 8.22, 10.96 г. Чем короче кривая, тем больше сдвиг по фазе. Эти кривые также имеют волнообразную синусоидальную форму, однако их экстремумы сдвинуты. Кривая 3 кумулятивной суммы, полученная в результате сдвига поля южного полюса относительно поля северного полюса на 10.96 г. и кривая 2 кумулятивной суммы магнитного поля северного полюса почти полностью совпадают.

В таблице приведены моменты экстремумов кумулятивных сумм рядов при различных сдвигах. Видно, что период всех кумулятивных сумм независимо от величины фазового сдвига (не равному 11 годам)

Моменты экстремумов кумулятивных сумм рядов при различных сдвигах

Фазовый сдвиг, лет	Момент максимума	Момент минимума	Момент максимума
1.37	1986	1994	2006
2.74	1984.5	1994	2006
5.50	1982.5	1992	2003
8.22	1981	1991	2001
10.96	1980	1990	2001
N	1980	1990	2000
N—S	1980	1990	2000

составляет 20—22 г., а фазы роста и спада длятся 11 лет.

Таким образом, анализ вариаций кумулятивной суммы временно-го ряда является весьма успешным инструментом для поиска скрытых долговременных периодичностей.

Следует отметить, что есть различные подходы для выделения периодичностей во временных рядах. Наиболее известные — фурье- и вейвлет-анализ. Однако кумулятивная сумма ряда дает возможность не только выделить периодичности в исследуемом временном ряду, но и определить моменты максимумов и минимумов периодических процессов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Долговременные вариации асимметрии площади пятен (локальных полей). В исследованиях северо-южной асимметрии наиболее часто изучаются ненормированный (абсолютный) индекс $NSA = A_N - A_S$ и нормированный индекс $NSA_n = (A_N - A_S)/(A_N + A_S)$. Следует отметить, что изменение со временем этих индексов не идентично [1], так как один индекс больше изменяется в минимуме активности, а другой — в максимуме. Северо-южная асимметрия также проявляется в различной длительности процессов активности в северном и южном полушариях. Например, циклы пятнообразования в северном и южном полушариях начинаются неодновременно, и их длительности различны [13].

На рис. 3 показано изменение кумулятивной суммы временных рядов нормированной и ненормированной северо-южной асимметрии, вычисленной по среднемесячным значениям площади солнечных пятен.

Как видно, кривые обеих кумулятивных сумм имеют волнообразную форму, изменяются примерно синхронно и имеют два экстремума — один минимум и один максимум. Это часть квазипериодического процесса; интервал от минимума до максимума — ветвь роста — составляет половину полного цикла. С 1875 г. по 1915 г. (от начала исследуемого интервала и до минимума) кумулятивные суммы умень-

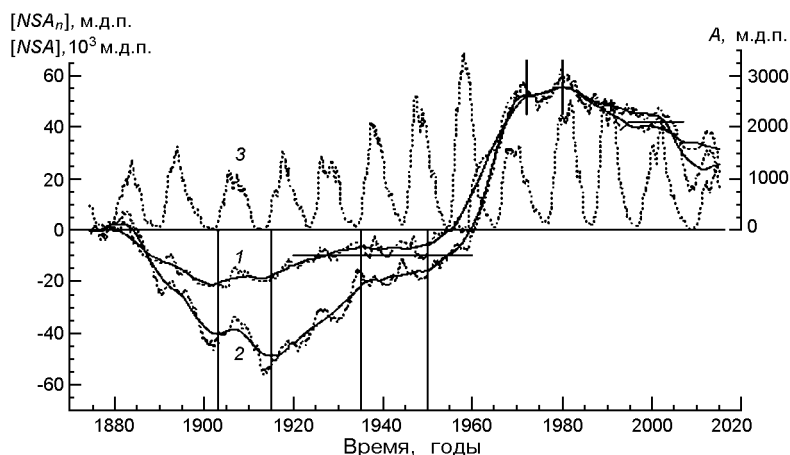


Рис. 3. Изменение со временем кумулятивных сумм рядов нормированной (кривая 1, $[NSA_n]$) и абсолютной (кривая 2, $[NSA]$) асимметрии солнечной активности (шкала слева), сплошные линии — их сглаженные значения. Кумулятивные суммы получены по ряду среднемесячных значений площади пятен (кривая 3, шкала справа)

шаются, на интервале 1915—1980 гг. — увеличиваются, после 1980 гг. опять уменьшаются. То есть, в 1875—1915 гг. по индексу суммарной площади пятен преобладало южное полушарие, в 1915—1980 гг. — северное, после 1980 г. — южное. Оба экстремума имеют два разных по интенсивности горба, второй боолее интенсивный в обоих случаях. Сплошными толстыми вертикальными линиями показаны моменты максимумов этих горбов. В минимуме первый горб наблюдается в 1900—1903 гг., второй — в 1912—1915 гг. В максимуме первый горб наблюдается примерно в 1973 г., второй — в 1980 г. Расстояние между первой и второй парой экстремумов в минимуме и максимуме кумулятивной суммы составляет примерно 70 и 65 лет. Можно предположить, что длительность полного цикла равна 130—140 лет.

Еще одна особенность кривых — наличие плато, где кумулятивная сумма почти не изменяется. Плато отмечены сплошными тонкими горизонтальными линиями, тонкие сплошные вертикальные линии — моменты их начала и конца. На ветви роста это интервал 1935—1950 гг., на ветви спада — 1995—2003 гг. В эти короткие интервалы не было доминирования относительно полушарий по индексу суммарная площадь пятен.

На рис. 4, взятом из работы [13], показан цикл Гляйсберга. Видно, что второй минимум кривой попадает приблизительно на циклы 14—15, следующий за ним максимум — на циклы 19—20. Минимум и максимум на кривой кумулятивной суммы также попадает на эти моменты.

Вариации асимметрии крупномасштабного поля Солнца. На рис. 5 показано изменение суточных значений H_0 ОМПС (а) и его секторной структуры (б). На рис. 5, в точками приведены их кумулятивные суммы, толстой сплошной линией — сглаженные значения куму-

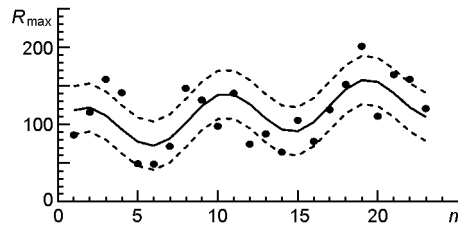


Рис. 4. Цикл Гляйсберга по данным [13]

лятивной суммы $[H_0]$, штриховой толстой линией — сглаженные значения кумулятивной суммы $[S]$ секторной структуры. Прямые линии — соответственно их линейные тренды. Кривые имеют различный ход, однако видна их синхронность. Обе кривые имеют два максимума и два минимума, причем оба максимума двугорбые, первый минимум — плато, во втором минимуме пока виден один горб. Моменты максимумов этих горбов показаны вертикальными линиями. По сути это кривые 22-летнего циклического процесса (равному циклу Хейла) с фазами роста и спада 11 лет. Следует упомянуть, что при анализе спектров мощности ОМПС неоднократно указывалось на наличие мощного 22-летнего пика и очень слабого пика с периодом 11 лет. Однако тренды этих кривых совершенно разные. Кумулятивная сумма секторной структуры почти не имеет тренда, в то время как кумулятивная сумма ОМПС имеет значительный тренд. Это значит, что секторная структура, обладая циклическостью в преобладании площади полей положительной и отрицательной полярности приблизительно в 22 г., не имеет более длинных циклов.

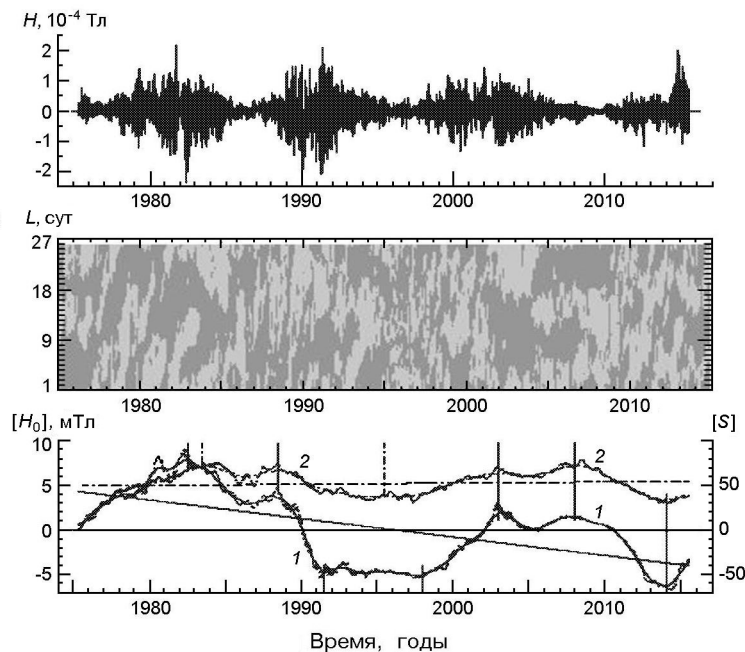
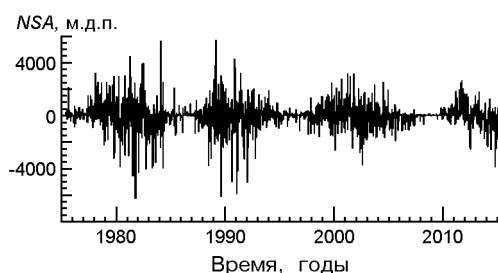


Рис. 5. Изменение со временем: а — общего магнитного поля Солнца H_0 (ОМПС), б — его секторной структуры L , в — кумулятивных сумм $[H_0]$ (линия 1) и $[S]$ (линия 2). Прямые линии — линейные тренды кумулятивных сумм

Рис. 6. Ход абсолютного индекса асимметрии NSA , вычисленного по рядам суточных значений площади солнечных пятен северного и южного полушарий



Значительный отрицательный тренд кривой кумулятивной суммы ОМПС указывает на то, что индекс величины поля имеет длительный цикл своего изменения, и имеющийся в нашем распоряжении интервал наблюдения находится на ветви спада этого цикла.

На рис. 6 приведены значения индекса асимметрии NSA , вычисленного по рядам суточных значений площади солнечных пятен северного и южного полушарий. Как видим, этот график похож на график изменения суточных значений ОМПС (рис. 5, а).

Мы сравнили ход кривых кумулятивных сумм $[H_0]$ суточных значений ОМПС и асимметрии $[NSA]$ суточных суммарных значений площади пятен северного и южного полушарий на интервале времени 1975—2015 гг. (рис. 7). Несмотря на различный характер приведенных кумулятивных сумм, их изменение синхронно до 2005.5 г. После этого момента их изменение происходит в противофазе. Отметим, что этот момент попадает на затяжной минимум 24-го цикла. На обеих кривых имеется плато приблизительно в одно и то же время. Также видно, что линейные тренды $[NSA] = 399.781 - 0.201487d$, $[NSA_n] = 384.876 - 0.193975d$ и $[H_0] = 414.619 - 0.207712d$ почти параллельны. А это подтверждает высказанное выше предположение о том, что индекс северно-южной асимметрии величины поля имеет какой-то дли-

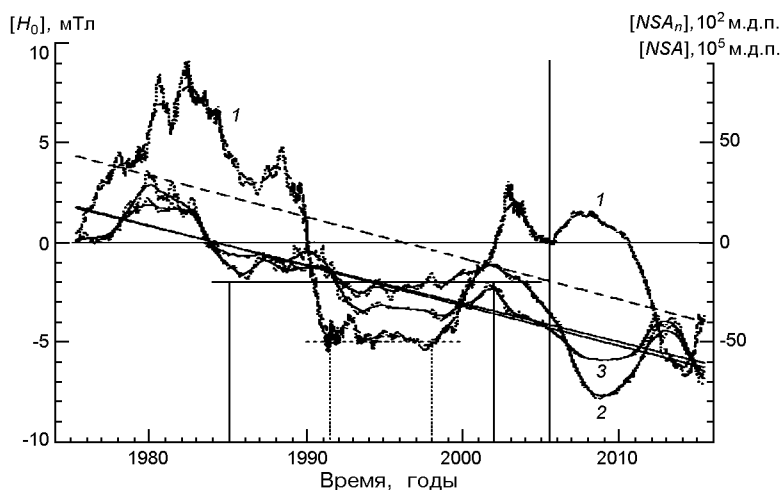


Рис. 7. Вариации кумулятивной суммы ряда ОМПС (1 — суточные и сглаженные значения $[H_0]$) и кумулятивных сумм рядов индексов асимметрии площади солнечных пятен (2, 3 — суточные и сглаженные значения $[NSA]$ и $[NSA_n]$). Наклонные прямые — тренды кумулятивных сумм

тельный цикл своего изменения, и имеющийся в нашем распоряжении интервал наблюдения находится на ветви спада этого цикла. Параллельность линий тренда дает возможность предположить, что этот цикл может быть такой же длины, как и цикл асимметрии площади пятен. В принципе это понятно, поскольку площадь пятен пропорциональна величине их магнитного поля. Следовательно, асимметрия величины магнитных полей как крупномасштабных, так и мелкомасштабных (полоидального и тороидального компонентов) имеет приблизительно 130—140-летнюю цикличность.

ВЫВОДЫ

На примере временного ряда полярного магнитного поля Солнца показано, что анализ вариаций кумулятивной суммы временного ряда дает положительные результаты при поиске циклических (периодических) вариаций. Период кумулятивной суммы рядов полярного магнитного поля равен 22-летнему магнитному циклу Хейла, фазы роста и спада — 11-летнему циклу солнечной активности.

На основе анализа кумулятивной суммы асимметрии временного ряда площади солнечных пятен выделен долговременный цикл северо-южной асимметрии солнечной активности (мелкомасштабных магнитных полей, тороидального компонента) длительностью порядка 140 лет.

Сравнительный анализ вариаций суточных значений общего магнитного поля Солнца как звезды и асимметрии суточных значений площади солнечных пятен на временном интервале 1975—2015 гг. показал, что, возможно, крупномасштабное магнитное поле Солнца (полоидальный компонент) также имеет близкий к 140 г. долговременный цикл. Изменения асимметрии крупномасштабных и мелкомасштабных полей Солнца до 2005.5 г. происходили синхронно, после этого момента — в противофазе. Этот момент времени попадает на затяжной минимум 24 цикла.

В работе использованы данные сайта <http://solarscience.msfc.nasa.gov/greenwch.shtml> и Обсерватории имени Вилкокса Стенфордского университета. Автор выражает глубокую благодарность за возможность использовать эти данные.

1. Лейко У. М. Про деякі особливості північно-південної асиметрії сонячної активності // Вісник Київ. ун-ту. Астрономія.—2011.—**47**.—С. 23—26.
2. Лейко У. М. Особенности асимметрии солнечной активности в течение различных временных интервалов // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории.—2013.—**109**, № 4.—С. 1—4.
3. Мордвинов А. В. Долговременные изменения асимметрии магнитного поля Солнца и гелиосферы // Астрон. журн.—2006.—**83**, № 11.—С. 1042—1049.
4. Antonucci E., Hoeksema J. T., Scherrer P. H. Rotation of the photospheric magnetic fields — A north-south asymmetry // Astrophys. J.—1990.—**360**.—P. 296—304.

5. *Babcock H. D.* The Sun's polar magnetic field // *Astrophys. J.*—1959.—**130**.—P. 364—366.
6. *Babcock H. W.* The topology of the Sun's magnetic field and the 22-year cycle // *Astrophys. J.*—1961.—**133**.—P. 572—587.
7. *Ballester J. L., Oliver R., Carbonell M.* The periodic behaviour of the North-South asymmetry of sunspot areas revisited // *Astron. and Astrophys.*—2005.—**431**.—P. L5—L8.
8. *Carbonell M., Oliver R., Ballester J. L.* On the asymmetry of solar activity // *Astron. and Astrophys.*—1993.—**274**.—P. 497—504.
9. *Carbonell M., Terradas J., Oliver R., Ballester J. L.* The statistical significance of the North-South asymmetry of solar activity revisited // *Astron. and Astrophys.*—2008.—Astro-phmanuscript no. 0454.
10. *Donner R., Thiel M.* Scale-resolved phase coherence analysis of hemispheric sunspot activity: a new look at the north-south asymmetry // *Astron. and Astrophys.*—2007.—**475**.—P. L33—L36.
11. *Hale G. E.* On the probable existence of a magnetic field in sun-spots // *Astrophys. J.*—1908.—**28**.—P. 315—343.
12. *Hale G. E., Ellerman F., Nicholson S. B., Joy A. H.* The Magnetic Polarity of Sunspots // *Astrophys. J.*—1919.—**49**.—P. 153—178.
13. *Hathaway D. H.* The solar cycle // arXiv:1502.07020v1 [astro-ph.SR].—2015.— <http://solarscience.msfc.nasa.gov/>.
14. *Newton H. W., Milson A. S.* Note on the observed differences in spottedness of the Sun's northern and southern hemispheres // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—1956.—**465**.—P. 398—404.
15. *Ozguc A., Atac T., Rybak J.* Temporal variability of the flare index (1996—2001) // *Solar Phys.*—2003.—**214**. N 1.—P. 145—155.
16. *Zhang L., Mursula K., Usoskin I.* Solar surface rotation: N-S asymmetry and recent speed-up // *Astron. and Astrophys.*—2015.—**575**.—P. L2.

Статья поступила в редакцию 12.11.2015

УДК 52-13, 521.95

Н. В. Майгурова, М. В. Мартынов, В. Ф. Крючковский

Научно-исследовательский институт «Николаевская астрономическая обсерватория»
ул. Обсерваторная 1, Николаев, 54030
nadija@mao.nikolaev.ua

**Результаты астрометрических наблюдений звезд
с большими собственными движениями на телескопах
НИИ «Николаевская астрономическая обсерватория»**

В период 2008—2014 гг. на телескопах Николаевской обсерватории проводились астрометрические ПЗС-наблюдения звезд с большими собственными движениями. По результатам наблюдений создан каталог положений и собственных движений 1596 быстрых звезд, собственные движения которых превышают 150 мсд/год. Каталог охватывает зону склонений от 0 до 65°. Стандартная ошибка полученных собственных движений составляет 1...10 мсд/год по обеим координатам в зависимости от наблюдательной истории звезды. Для вывода собственных движений использовались данные восьми различных звездных каталогов и обзоров. Приведены результаты сравнения полученных собственных движений с данными современных каталогов и результаты применения статистического критерия для поиска возможных невидимых компонентов.

РЕЗУЛЬТАТИ АСТРОМЕТРИЧНИХ СПОСТЕРЕЖЕНЬ ЗІРОК З ВЕЛИКИМИ ВЛАСНИМИ РУХАМИ НА ТЕЛЕСКОПАХ НДІ «МИКОЛАЇВСЬКА АСТРОНОМІЧНА ОБСЕРВАТОРІЯ», Майгурова Н. В., Мартынов М. В., Крючковський В. Ф. — У період 2008—2014 рр. на телескопах Миколаївської обсерваторії проводилися астрометричні ПЗС-спостереження зірок з великими власними рухами. За результатами спостережень створено каталог положень і власних рухів 1596 швидких зірок, власні рухи яких перевищують 150 мсд/рік. Каталог охоплює зону схилень від 0 до 65°. Стандартна похибка отриманих власних рухів становить 1...10 мсд/рік по обох координатах, залежно від спостережної історії зірки. Для виведення власних рухів викорис-

товувалися дані восьми різних зоряних каталогів і оглядів. Наведено результати порівняння отриманих власних рухів з даними сучасних каталогів і результати застосування статистичного критерію для пошуку можливих невидимих компонентів.

RESULTS OF THE ASTROMETRIC OBSERVATIONS OF STARS WITH LARGE PROPER MOTIONS AT THE RESEARCH INSTITUTE “NIKOLAEV ASTRONOMICAL OBSERVATORY” TELESCOPES, by Maigurova N. V., Martynov M. V., Kryuchkoskiy V. F. — The astrometric CCD observations of stars with large proper motion were carried out at Nikolaev Observatory telescopes during 2008—2014 years. The catalog of positions and proper motions of the 1596 fast stars with proper motions exceeding 150 mas/year was obtained. The catalog covers the declination zone from 0 to 65°. Depending on the observational star history standard errors of the received proper motions were in the range from 1 to 10 mas/year by both coordinates. 8 different star catalogs and surveys were used to calculate the new proper motion data. The results of the comparison of the obtained proper motions with data from other astronomical catalogs and results of statistical test for search possible candidates with invisible components are also presented.

ВВЕДЕНИЕ

Звезды с большими собственными движениями являются ценными объектами для решения целого ряда астрофизических задач, но при отождествлении этих объектов возникают определенные трудности, поэтому в современных астрометрических каталогах значительная часть этих звезд оказывается пропущенной. Это обстоятельство приводит к тому, что эти звезды имеют бедную наблюдательную историю и их собственные движения часто определяются с невысокой точностью. Так детальный анализ списка звезд с большими собственными движениями, отобранных в качестве объектов для обнаружения эффектов микролинзирования, показал, что только 3 % звезд этого списка имеют заявленные собственные движения [6]. В большинстве своем звезды с высокими собственными движениями — это близкие звезды, поэтому они по-прежнему являются главными кандидатами для определений тригонометрических параллаксов и поиска объектов низкой светимости в окрестностях Солнца. На сегодняшний день наиболее полными каталогами звезд с собственными движениями являются: каталог LSPM, полученный на основе результатов сканирования фотографических пластинок (DSS) из программы Паломарских обзоров неба (POSSI и POSSII) [5] и сводный каталог звезд с большими собственными движениями, поддерживаемый Главной астрономической обсерваторией Национальной академии наук Украины [1]. Оба каталога включают только звезды северной полусферы в зоне

склонений от 0 до +90 . Каталог LSPM содержит 61977 звезд с собственными движениями более 150 мсд/год и полон на 98 % для звезд до 19^m. Декларируемая точность собственных движений в каталоге LSPM составляет 10 мсд/год. Для южной полусферы имеются лишь отдельные списки звезд, однако данные каталогов UCAC4 и PPMXL указывают на то, что число звезд с большими собственными движениями в южной полусфере, по-видимому, гораздо больше.

ИНСТРУМЕНТЫ И ПРОГРАММА НАБЛЮДЕНИЙ

Звезды с большими собственными движениями являются довольно яркими объектами, что позволяет получать их наблюдения с высокой точностью на небольших телескопах. Наблюдения звезд с большими собственными движениями выполнялись в Научно-исследовательском институте «Николаевская астрономическая обсерватория» (НИИ НАО) в течение 2008—2014 гг. на аксиальном меридианном круге (АМК) [2] и телескопе «Мобител» [3]. Оба инструмента оснащены ПЗС-камерами и используют для наблюдений режим синхронного переноса заряда.

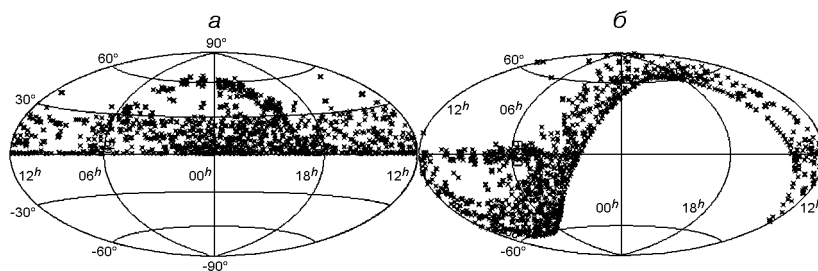


Рис. 1. Распределение звезд каталога по небесной сфере: *а* — в экваториальных координатах, *б* — в галактических координатах

Программа наблюдений была сформирована на основе объектов из каталога LSPM. В программу наблюдений для телескопа АМК вошли звезды 9...15^m, для наблюдений на телескопе «Мобител» эта программа была расширена до 17^m. Наблюдения на телескопе «Мобител» также проводились вблизи меридиана при значении часового угла $\pm 1^h$. Каталог покрывает весь диапазон прямых восхождений в области склонений от 0 до +65 . Распределение звезд каталога по небесной сфере в экваториальных и галактических координатах приведено на рис. 1, который показывает, что исследуемые звезды принадлежат как к звездам плоской составляющей населения Галактики, так и к звездам гало.

ВЫЧИСЛЕНИЕ СОБСТВЕННЫХ ДВИЖЕНИЙ И ХАРАКТЕРИСТИКИ КАТАЛОГА

Обработка и астрометрическая редукция полученных ПЗС-кадров выполнялась по стандартной схеме [4]. Основной объем астрометрических редукций был выполнен с использованием опорного каталога UCAC2 [10]. Для звезд, склонения которых превышают 40° , в качестве опорного использовался каталог UCAC4 [9]. Поскольку оба каталога получены в системе HCRF, и систематические разности между этими каталогами не превышают случайную погрешность наших наблюдений, мы не приводили положения всех звезд в систему одного опорного каталога. Экваториальные координаты программных звезд представляют собой средние значения координат, вычисленные по всем ПЗС-кадрам, на которых есть изображение этой звезды, и относятся к среднему моменту наблюдения. В качестве оценки точности координат звезд мы использовали стандартную ошибку среднего положения. Разброс отдельных моментов наблюдений для каждой звезды, как правило, не превышает 1-2 мес в силу специфики меридианных наблюдений, поэтому мы не учитывали собственные движения при оценивании ошибки. Средняя стандартная ошибка составила 25 мсд по обоим координатам, среднее число наблюдений одной звезды (медиана распределения) — 10 раз.

На рис. 2 представлены гистограммы распределения количества N программных звезд по значениям стандартных ошибок положений.

Как уже отмечалось, большая величина собственного движения рассматриваемых звезд создает определенные трудности при отождествлении таких объектов, даже при относительно небольшой разности эпох (в случае с каталогами 2mass, CMC15 — порядка 10 лет). Первым этапом кроссидентификации наших данных был поиск всех возможных объектов каталога LSPM, которые попали в поле зрения наших ПЗС-кадров, поскольку кроме программных объектов туда могли попасть и другие звезды каталога LSPM. На этом этапе была выполнено отождествление полученных массивов положений звезд с каталогом LSPM, при этом положения звезд каталога LSPM предварительно переводились на среднюю эпоху полученных наблюдений.

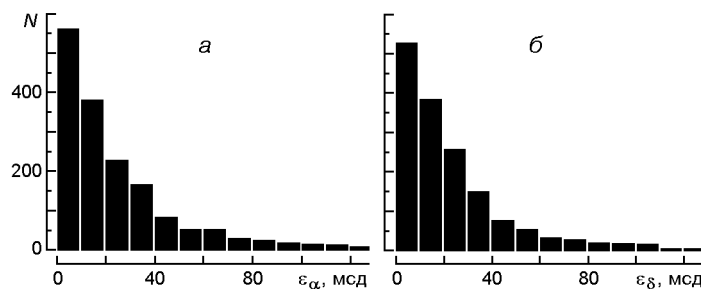


Рис. 2. Гистограммы распределения количества N программных звезд по значениям стандартных ошибок положений: a — по прямому восхождению, b — по склонению

Таблица 1. Каталоги, использовавшиеся в качестве источника положений при вычислении новых собственных движений

Каталог	Номер CDS	Период наблюдений	Количество общих звезд
NikHPM		2008.3—2014.7	1596
USNO A2.0	I/252	1949.9—1957.3	1575
Tycho2	I/259	1991.4—1992.0	441
2mass	II/246	1997.4—2001.1	1596
CMC15	I/327	1999.2—2010.3	1413
GSC2.3	I/305	1980.2—2002.2	1437
SDSS DR9	V/139	1998.8—2009.9	687
Wise	II/328	2010.56	1583
M2000	I/272	1998.9	210

Всего было найдено 1596 звезд каталога LSPM, которые наблюдались более трех раз за период с 2008 по 2014 гг. Для того чтобы получить новые собственные движения этих звезд, необходимо было отождествить их в других каталогах, которые содержат положения звезд на момент наблюдения, не совпадающий с нашим. На этом этапе отождествления положения наших звезд переводились на среднюю эпоху наблюдения каталога, выбранного в качестве первой эпохи, также с использованием собственных движений каталога LSPM. Кроссидентификация и поиск данных выполнялись с помощью собственного программного обеспечения, web-сервиса Vizier Центра астрономических данных в Страсбурге [4] и программного пакета TOPCAT [7].

Каталоги, которые выбирались в качестве источника положений для вычисления собственных движений, должны были содержать оригинальные положения звезд на момент наблюдений, по возможности удаленный от наших наблюдений, и иметь позиционную точность не хуже 0.25 .

В табл. 1 приведен список каталогов, которые использовались в качестве источника других эпох положений, и результаты кроссидентификации позиционного массива наших данных (NikHPM) с этими каталогами. При вычислении собственных движений положения в используемых каталогах не исправлялись за систематические разности, поскольку все они отнесены к системе HCRF/Tycho2. Как можно видеть из табл. 1, количество используемых положений для вычисления новых собственных движений варьирует от 4 до 9.

Вычисление собственных движений звезд было выполнено с использованием линейной модели движения для каждой звезды. Для этого методом наименьших квадратов решалась система линейных уравнений:

$$\begin{pmatrix} x(t) \\ y(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x(t_0) \\ y(t_0) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \mu_x \\ \mu_y \end{pmatrix} (t - t_0),$$

где момент t_0 соответствует середине временного интервала наблюдений.

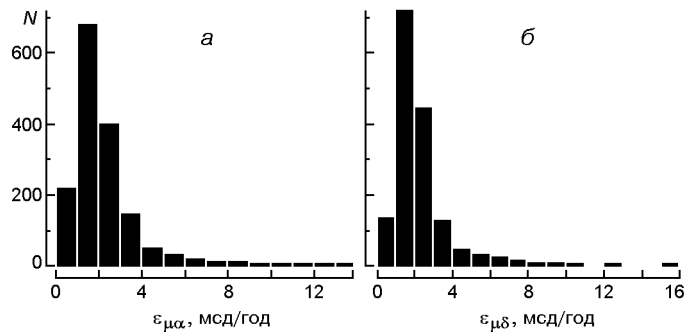


Рис. 3. Гистограммы распределения количества N программных звезд по значениям стандартных ошибок собственных движений: a — по прямому восхождению, b — по склонению

Решение системы выполнялось с единичной весовой матрицей. На рис. 3 приведены гистограммы распределения количества N программных звезд по значениям стандартных ошибок собственных движений звезд, полученные в результате решения МНК. Видно, что стандартные ошибки определения собственных движений для большей части рассматриваемых звезд составляют 1...8 мсд/год. Средняя ошибка составляет 2 мсд/год по обеим координатам. Для 3 % звезд ошибки собственных движений оказались довольно значительными (до 25 мсд/год). Возможными причинами этого могут быть как ошибки отдельных каталогов, так и ошибочные отождествления. Большая плотность звезд в области Млечного пути (от 2000 до 10000 на кадре) создает определенные трудности на этапе кроссидентификации даже при подключении дополнительных фотометрических критериев при отождествлении. Следует отметить, что собственные движения звезд в разных каталогах для этой области также имеют значительные расхождения, которые в несколько раз превышают декларируемую среднюю точность отдельных каталогов.

В табл. 2 представлен формат полученного каталога. Полный каталог в формате VO-table доступен на интернет-сайте НИИ НАО по адресу http://www.nao.nikolaev.ua/index.php?catalog_id=408.

РЕЗУЛЬТАТЫ СРАВНЕНИЯ ПОЛУЧЕННЫХ СОБСТВЕННЫХ ДВИЖЕНИЙ С ДАННЫМИ ДРУГИХ КАТАЛОГОВ

Для получения оценки внешней точности было выполнено сравнение полученных новых собственных движений с данными других каталогов.

Табл. 3 содержит средние значения разностей собственных движений по прямому восхождению и склонению, их средние квадратичные отклонения и число общих звезд с учетом выбросов по критерию 3-сигма. Полученные результаты показывают хорошее согласие

Таблица 2. Формат полученного каталога

ID	Номер звезды из каталога LSPM
RA	Прямое восхождение на среднюю эпоху наблюдения, град.
e_RA	Стандартная ошибка прямого восхождения, мсд
Dec	Склонение на среднюю эпоху наблюдения, град
e_Dec	Стандартная ошибка склонения, мсд
m_RA	Собственное движение по прямому восхождению ($\cos \delta$), мсд/год
e_m_RA	Стандартная ошибка собственного движения по прямому восхождению ($\cos \delta$), мсд/год
m_Dec	Собственное движение по склонению, мсд/год
e_m_Dec	Стандартная ошибка собственного движения по склонению, мсд/год
EPOCH_Nik	Средняя эпоха наблюдений, год
N	Количество полученных положений
N1	Количество использованных каталогов при вычислении собственного движения
Mag	Звездная величина в системе опорного каталога UCAC2/UCAC4
F2	Значение параметра статистического критерия

Таблица 3. Средние разности $\Delta \mu_{\alpha^*}$, $\Delta \mu_{\delta}$ полученных оценок собственных движений и значений из других каталогов, а также их средние квадратичные отклонения $\sigma_{\mu_{\alpha^*}}$, $\sigma_{\mu_{\delta}}$

Каталог	$\Delta \mu_{\alpha^*}$, мсд/год	$\Delta \mu_{\delta}$, мсд/год	$\sigma_{\mu_{\alpha^*}}$, мсд/год	$\sigma_{\mu_{\delta}}$, мсд/год	N
LSPM	-1.3	8.9	0.7	8.7	1567
UCAC2	-0.0	5.4	0.6	5.3	576
UCAC4	-1.0	6.9	0.6	6.8	1175
PPMX	0.3	7.3	0.5	8.3	980
PPMXL	0.2	7.8	0.2	7.7	1383
Tycho2	0.3	5.5	1.1	5.5	424

полученных значений с данными других исследований. Как видно, количество звезд, отброшенных по критерию 3-сигма, не превышало 3 % для всех рассматриваемых каталогов. Сравнение наших данных с каталогом LSPM подтверждает заявленную составителями каталога точность собственных движений и полноту этого каталога. В данной работе не ставилась отдельная задача поиска новых быстрых звезд, но анализ массива полученных собственных движений всех звезд, попавших в поле зрения, не выявил объектов, собственные движения которых значительно превышают 150 мсд/год в северной полусфере.

Данные попарных сравнений каталогов позволяют получить оценку внешней ошибки. В случае, когда мы имеем три независимых каталога, дисперсия разностей собственных движений будет равна сумме дисперсий их ошибок, что позволяет получить ошибки каждого из использовавшихся каталогов. В качестве каталогов с независимыми данными использовались собственные движения из каталогов UCAC2 и PPMX. Полученная таким образом оценка внешней точности наших собственных движений по общему массиву из 517 звезд составляет 4.5 мсд/год по обеим координатам.

ПОИСК ЗВЕЗД С НЕВИДИМЫМИ СПУТНИКАМИ

В процессе выполнения сравнения наших данных с различными каталогами были получены несколько вариантов собственных движений на разных временных интервалах. Согласно работе [8] существенные различия между этими собственными движениями могут указывать на наличие невидимых компонентов у данной звезды. Для количественной оценки вероятности отнесения звезды к неодиочным звездам в работе [8] предлагается использовать статистику

$$F^2 = \frac{\mu_{\alpha}^2}{\sigma_{\alpha}^2} + \frac{\mu_{\delta}^2}{\sigma_{\delta}^2},$$

где μ_{α} , μ_{δ} — соответствующие различия собственных движений, полученных с разными каталогами, σ_{α} , σ_{δ} — их ошибки.

Объекты, для которых $F > 3.44$, рассматриваются как двойные звезды, имеющие невидимые компоненты. Для использования этого метода мы сравнивали различия между двумя массивами собственных движений. Первый был получен с использованием каталога USNO A2.0 в качестве источника положений на первую эпоху, второй — каталога 2mass.

Разность эпох наших наблюдений с каталогом USNO A2.0 составляет около 60 лет, что позволяет, несмотря на относительно невысокую точность фотографических положений и наличие систематических зональных погрешностей в этом каталоге, получить собственные движения для наших звезд с точностью порядка 5 мсд/год. Эти собственные движения могут считаться средними, поскольку получены на достаточно большом промежутке времени. Средняя разность эпох наблюдений звезд каталога 2mass с нашими данными составляет около 11 лет, что позволяет рассматривать их как «квазимгновенные». Точность этих собственных движений составляет 4...12 мсд/год.

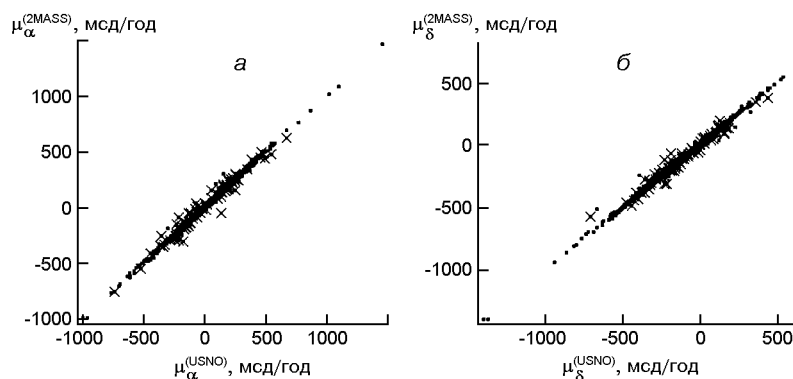


Рис. 4. Сравнение собственных движений по прямому восхождению (слева) и склонению (справа), полученных с использованием каталогов USNO A2.0 и 2mass в качестве первой эпохи положений

В результате проверки нашего каталога звезд на двойственность была обнаружена 101 звезда со значением параметра F , превышающем критическое.

Этот список звезд был сопоставлен со всеми каталогами и таблицами данных, которые содержатся в базе Страсбургского центра астрономических данных.

Около 30 % звезд оказались известными тесными двойными системами, что подтверждает работоспособность используемого критерия, однако окончательный вывод о двойственности (либо кратности) остальных звезд возможно сделать лишь после дополнительных исследований. Причинами ошибочного появления значимых разностей могут быть как ошибки используемых каталогов, так и ошибки отождествления, особенно это касается звезд, находящихся в плоскости Галактики.

Графическое сопоставление полученных пар собственных движений приведено на рис. 4, где звезды со значением параметра $F > 3.44$ выделены крестиком.

ВЫВОДЫ

На основе ПЗС-наблюдений на двух телескопах Научно-исследовательского института «Николаевская астрономическая обсерватория» определены экваториальные координаты и собственные движения 1596 быстрых звезд каталога LSPM (полная величина собственного движения более 150 мсд/год). Комбинация положений на современную эпоху с данными нескольких каталогов позволила вычислить новые собственные движения этих звезд со средней точностью порядка 2 мсд/год. Среднее число наблюдений каждой звезды составляет не менее трех раз. Для отдельных звезд выполнено достаточно большое количество наблюдений, разнесенных по времени, что является ценным материалом для выявления неравномерностей в движениях этих звезд. В настоящее время мы продолжаем наблюдения звезд с собственными движениями более 400 мсд/год. Высокая позиционная точность наших наблюдений позволяет в будущем надеяться на успешное получение оценок тригонометрических параллаксов для этих звезд.

1. *Иванов Г. И.* Каталог звезд с большими собственными движениями (версия 1) // Кинематика и физика небес. тел.—2005.—**21**, № 2.—С. 156—158.
2. *Майгурова Н. В., Мартынов М. В., Пинигин Г. И.* Каталог звезд в площадках аксиального меридианного круга Николаевской обсерватории // Кинематика и физика небес. тел.—2013.—**29**, № 1.—С. 68—80.
3. *Шульга А. В., Козырев Е. С., Сибирякова Е. С.* Мобильный комплекс телескопов НИИ НАО для наблюдений объектов околоземного космического пространства // Космічна наука і технологія.—2012.—**18**, № 4.—С. 52—58.

4. *Bonnarel F., Fernique P., Bienayme O., et al.* The ALADIN interactive sky atlas. A reference tool for identification of astronomical sources // *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.*—2000.—**143**.—P. 33—40.
5. *Lepine S., Shara M.* A catalog of northern stars with annual proper motions larger than 0.15" (LSPM-NORTH Catalog) // *Astron. J.*—2005.—**129**.—P. 1483—1522.
6. *Proft S., Demleitner M., Wambsganss J., et al.* Prediction of astrometric microlensing events during the Gaia mission // *Astron. and Astrophys.*—2011.—**536**.—id. A50.—11 p.
7. *Taylor M. B.* TOPCAT & STIL: Starlink table/VOTable processing software // *ASP Conf. Ser.*—2005.—Vol. **347**.—P. 29.—(Proceedings of the Conference «Astronomical Data Analysis Software and Systems XIV», held 24—27 October, 2004 in Pasadena, California, USA / Eds P. Shopbell, M. Britton, R. Ebert. — San Francisco: Astronomical Society of the Pacific).
8. *Wielen R., Lenhardt H., Schwan H., et al.* Indications on the binary nature of individual stars derived from a comparison of their HIPPARCOS proper motions with ground-based data. I. Basic principles // *Astron. and Astrophys.*—1999.—**346**.—P. 675—685.
9. *Zacharias N., Finch C. T., Girard T. M., et al.* The fourth U. S. Naval Observatory CCD Astrograph Catalog (UCAC4) // *Astron. J.*—2013.—**145**, N 2.—id. 44.—14 p.
10. *Zacharias N., Urban S. E., Zacharias M. I., et al.* The second U. S. Naval Observatory CCD Astrograph Catalog (UCAC2) // *Astron. J.*—2004.—**127**, N 5.—P. 3043—3059.

Статья поступила в редакцию 21.12.15

УКАЗАТЕЛЬ
материалов, опубликованных в журнале
«Кинематика и физика небесных тел» в 2016 г. (том 32)

Составитель В. М. Клименко

- Алешин В. П., Гришин Е. А., Ивлев О. А., Новгородцев Д. Д., Шаргородский В. Д.* Больше-апертурные телескопы в задачах околоземной астрономии // № 5.—С. 68—73.
- Андреев М. В.* — см. Жилиев Б. Е.
- Андрук В. Н., Головня В. В., Иванов Г. А., Ижакевич Е. М., Пакуляк Л. К., Процюк Ю. И., Шатохина С. В.* Каталог экваториальных координат и *B*-величин звезд околополюсной области программы ФОН // № 1.—С. 56—69. (*a*)
- Андрук В. Н., Пакуляк Л. К., Головня В. В., Иванов Г. А., Яценко А. И., Шатохина С. В., Ижакевич Е. М.* Каталог экваториальных координат и *B*-величин звезд программы ФОН // № 5.—С. 74—80. (*b*)
- Антюфеев А. В., Шульга В. М., Зинченко И. И.* Биполярный молекулярный поток в источнике IRAS 17233-3606 // № 6.—С. 20—29.
- Бабаджанов П. Б., Кохирова Г. И., Обрубов Ю. В.* О кометной природе околоземного астероида 2003 EH1 // № 5.—С. 60—67.
- Бахтигараев Н. С., Левкина П. А., Рыхлова Л. В., Чазов В. В., Сергеев А. В., Карнов Н. В.* Характеристики малоразмерных фрагментов космического мусора по наблюдениям в обсерватории на пике Терскол // № 5.—С. 34—39. (*a*)
- Бахтигараев Н. С., Левкина П. А., Рыхлова Л. В., Сергеев А. В., Тарадий В. К., Карнов Н. В., Чазов В. В.* Исследование космического мусора в обсерватории на пике Терскол // № 5.—С. 40—44. (*b*)
- Бондаренко Ю. С.* — см. Медведев Ю. Д.
- Буромский М. И.* — см. Карбовский В. Л.
- Бутенко Г. З.* — см. Жилиев Б. Е.
- Вавилов Д. Е.* — см. Медведев Ю. Д.
- Ваврух М. В., Васильева И. Э., Стельмах О. Н., Тышко Н. Л.* Непрерывное поглощение и депрессия в спектре Солнца в области $\lambda = 650\text{--}820$ нм // № 3.—С. 40—62.
- Васильева И. Э.* — см. Ваврух М. В.
- Вениаминов С. С., Олейников И. И., Мельников Е. К.* Показатели роста угрозы космической деятельности со стороны космического мусора и меры обеспечения ее безопасности // № 5.—С. 25—33.
- Видьмаченко А. П.* Сезонные изменения на Юпитере. 1. Показатель активности полушарий // № 4.—С. 48—59.
- Видьмаченко А. П.* Сезонные изменения на Юпитере. 2. Влияние облучения планеты Солнцем // № 6.—С. 30—48.
- Видьмаченко А. П.* — см. Мороженко А. В. (*a*)
- Гнатик Р. Б.* Пошук джерел космічних променів з енергіями понад 10^{20} eВ // № 1.—С. 3—20.
- Гнатык Б. И.* — см. Федоров Ю. И.
- Гнатык Р. Б.* — см. Федоров Ю. И.
- Годунова В. Г.* — см. Жилиев Б. Е.
- Головня В. В.* — см. Андрук В. Н. (*a*)
- Головня В. В.* — см. Андрук В. Н. (*b*)
- Горшанов Д. Л.* — см. Девяткин А. В.
- Гришин Е. А.* — см. Алешин В. П.
- Девяткин А. В., Горшанов Д. Л., Львов В. Н., Цекмейстер С. Д., Чубей М. С.* Астрометрические базисные наблюдения тел Солнечной системы // № 5.—С. 45—51.
- Жданов В. И.* — см. Федорова Е. В.
- Жданов В. И.* — см. Федоров Ю. И.
- Жилиев Б. Е., Андреев М. В., Сергеев А. В., Годунова В. Г., Бутенко Г. З., Тарадий В. К.* Диагностика малых форм на поверхности астероида по данным быстрой спектроскопии // № 5.—С. 52—59.
- Зинченко И. И.* — см. Антюфеев А. В.
- Иванов Г. А.* — см. Андрук В. Н. (*a*)
- Иванов Г. А.* — см. Андрук В. Н. (*b*)

- Ивлев О. А.* — см. Алешин В. П.
- Ижакевич Е. М.* — см. Андрук В. Н. (*а*)
- Ижакевич Е. М.* — см. Андрук В. Н. (*б*)
- Ищенко М. В.* Определение скоростей движения восточноевропейских станций по данным ГНСС-наблюдений в Центре анализа ГНСС-данных ГАО НАН Украины // № 1.— С. 70—80.
- Карбовский В. Л., Лазоренко П. Ф., Буромский М. И., Касьян С. И., Свачий Л. Н.* Астрометрический каталог звезд экваториальной зоны КМАСЗ // № 4.—С. 73—80.
- Карпов Н. В.* — см. Бахтигараев Н. С. (*а*)
- Карпов Н. В.* — см. Бахтигараев Н. С. (*б*)
- Касьян С. И.* — см. Карбовский В. Л.
- Климушкин Д. Ю.* — см. Черемных О. К.
- Клюева А. И.* — см. Колесник Ю. Л.
- Колесник Ю. Л., Клюева А. И., Шахов Б. А., Федоров Ю. И.* Влияние высокоскоростных потоков солнечного ветра на интенсивность галактических космических лучей // № 6.—С. 3—19.
- Колесник Ю. Л.* — см. Федоров Ю. И.
- Кондрашова Н. Н.* Спектрополяриметрическое исследование бомбы Эллермана. I. Наблюдения // № 1.—С. 21—32.
- Кондрашова Н. Н.* Спектрополяриметрическое исследование бомбы Эллермана. II. Фотосферные модели // № 2.—С. 25—36.
- Корсунь А. О.* Визначення вікового руху полюса Землі за даними астрономічних спостережень. Пріоритет О. Я. Орлова // № 2.—С. 74—80.
- Кохирова Г. И.* — см. Бабаджанов П. Б.
- Крючковский В. Ф.* — см. Майгурова Н. В.
- Лазоренко П. Ф.* — см. Карбовский В. Л.
- Левкина П. А.* — см. Бахтигараев Н. С. (*а*)
- Левкина П. А.* — см. Бахтигараев Н. С. (*б*)
- Лейко У. М.* Вариации магнитной асимметрии Солнца // № 6.—С. 56—67.
- Лейко У. М.* — см. Пишкало Н. И.
- Лысенко П. Г.* — см. Мороженко А. В. (*а*)
- Лысенко П. Г.* — см. Овсак А. С.
- Львов В. Н.* — см. Девяткин А. В.
- Магер П. Н.* — см. Черемных О. К.
- Майгурова Н. В., Мартынов М. В., Крючковский В. Ф.* Результаты астрометрических наблюдений звезд с большими собственными движениями на телескопах НИИ «Николаевская астрономическая обсерватория» // № 6.—С. 68—80.
- Маловичко П. П.* Возбуждение пучками высокоскоростных протонов альвеновской турбулентности в солнечном ветре перед головной ударной волной Земли // № 2.— С. 48—73.
- Мартынов М. В.* — см. Майгурова Н. В.
- Медведев Ю. Д., Бондаренко Ю. С., Вавилов Д. Е., Шор В. А.* Проблемы исследования астероидно-кометной опасности // № 5.—С. 18—24.
- Мельников Е. К.* — см. Вениаминов С. С.
- Мороженко А. В., Овсак А. С., Видьмаченко А. П., Тейфель В. Г., Лысенко П. Г.* Мнимая часть показателя преломления аэрозоля в широтных полосах диска Юпитера // № 1.— С. 43—55. (*а*)
- Мороженко А. В., Овсак А. С.* О возможности определения мнимой части комплексного показателя преломления аэрозольных частиц в отдельном высотном облачном слое атмосферы Юпитера // № 6.—С. 49—55. (*б*)
- Неоменко Р., Новосядлий Б.* Динаміка розширення Всесвіту у моделях з немінімально зв'язаною темною енергією // № 4.—С. 3—22.
- Новгородцев Д. Д.* — см. Алешин В. П.
- Новосядлий Б.* — см. Неоменко Р.
- Обрубов Ю. В.* — см. Бабаджанов П. Б.
- Овсак А. С., Тейфель В. Г., Лысенко П. Г.* Вертикальная структура объемного коэффициента рассеяния аэрозоля в широтных поясах диска Юпитера // № 4.—С. 36—47.
- Овсак А. С.* — см. Мороженко А. В. (*а*)
- Овсак А. С.* — см. Мороженко А. В. (*б*)
- Олейников И. И.* — см. Вениаминов С. С.
- Пакуляк Л. К.* — см. Андрук В. Н. (*а*)
- Пакуляк Л. К.* — см. Андрук В. Н. (*б*)
- Пасечник М. Н.* Спектральное исследование пары бомб Эллермана // № 2.—С. 3—24.

- Пишкало Н. И., Лейко У. М.* Динамика околополярного магнитного поля Солнца в максимуме 24-го цикла // № 2.—С. 37—47.
- Присяжный А. И.* — см. Стодилка М. И. (б)
- Процюк Ю. И.* — см. Андрук В. Н.
- Рыхлова Л. В.* — см. Бахтигараев Н. С. (а)
- Рыхлова Л. В.* — см. Бахтигараев Н. С. (б)
- Рыхлова Л. В.* — см. Яцкив Я. С.
- Свачий Л. Н.* — см. Карбовский В. Л.
- Сергеев А. В.* — см. Бахтигараев Н. С. (а)
- Сергеев А. В.* — см. Бахтигараев Н. С. (б)
- Сергеев А. В.* — см. Жилиев Б. Е.
- Стельмах О. Н.* — см. Ваврух М. В.
- Стодилка М. И.* Диагностика поля горизонтальных скоростей в атмосфере Солнца: линия Ва II 455.403 нм // № 3.—С. 63—74. (а)
- Стодилка М. И., Присяжный А. И.* Диагностика атмосферы Солнца инверсионным неЛТР-методом: линия Ва II 455.403 нм // № 1.—С. 33—42. (б)
- Тарадий В. К.* — см. Бахтигараев Н. С. (б)
- Тарадий В. К.* — см. Жилиев Б. Е.
- Тарадий В. К.* — см. Яцкив Я. С.
- Тейфель В. Г.* — см. Мороженко А. В. (а)
- Тейфель В. Г.* — см. Овсак А. С.
- Тышко Н. Л.* — см. Ваврух М. В.
- Федорова Е. В., Жданов В. И.* Вариации рентгеновского спектра активного ядра галактики NGC 4945 по данным космической обсерватории INTEGRAL // № 4.—С. 23—35.
- Федоров Ю. И., Гнатык Р. Б., Гнатык Б. И., Колесник Ю. Л., Шахов Б. А., Жданов В. И.* Баллистические и диффузионные компоненты динамических спектров космических лучей сверхвысоких энергий от близких транзиентных источников // № 3.—С. 3—25.
- Федоров Ю. И.* — см. Колесник Ю. Л.
- Цекмейстер С. Д.* — см. Девяткин А. В.
- Чазов В. В.* — см. Бахтигараев Н. С. (а)
- Чазов В. В.* — см. Бахтигараев Н. С. (б)
- Черемных О. К., Климушкин Д. Ю., Магер П. Н.* О структуре азимутально-мелкомасштабных УНЧ-колебаний горячей космической плазмы в кривом магнитном поле. Моды с дискретным спектром // № 3.—С. 26—39.
- Черногор Л. Ф.* Волновые процессы в ионосфере над Европой, сопровождавшие солнечное затмение 20 марта 2015 г. // № 4.—С. 60—72.
- Чубей М. С.* — см. Девяткин А. В.
- Шаргородский В. Д.* — см. Алешин В. П.
- Шатохина С. В.* — см. Андрук В. Н. (а)
- Шатохина С. В.* — см. Андрук В. Н. (б)
- Шахов Б. А.* — см. Колесник Ю. Л.
- Шахов Б. А.* — см. Федоров Ю. И.
- Шор В. А.* — см. Медведев Ю. Д.
- Шульга В. М.* — см. Антюфеев А. В.
- Шустов Б. М.* О современном подходе к задаче обнаружения опасных небесных тел // № 5.—С. 11—17.
- Яценко А. И.* Новая версия каталога фотографического обзора северного неба (ФОН-2.0), полученная по результатам сканирования астронегативов // № 3.—С. 75—80.
- Яценко А. И.* — см. Андрук В. Н. (б)
- Яцкив Я. С., Рыхлова Л. В., Тарадий В. К.* Астрономия в Приэльзбрусье // № 5.—С. 3—10.