

## ПРОБЛЕМЫ КРИОЛОГИИ ЗЕМЛИ

УДК 523.2+551.34+551.324

### ОРБИТЫ ЗЕМЛИ И СОЛНЦА И ВОЗМОЖНЫЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА КРИОСФЕРУ ЗЕМЛИ (постановка проблемы и первые результаты)

В. П. Мельников, И. И. Смульский, О. И. Кротов, Л. И. Смульский

*Институт криосферы Земли СО РАН, 625000, Тюмень, а/я 1230, Россия*

Исследования последних лет вызывают сомнения в точности выводов астрономической теории ледниковых периодов. Для их проверки решена задача гравитационного взаимодействия тел Солнечной системы и проанализированы движения Солнца и Земли за несколько сотен лет. Результаты решения подтверждаются результатами наблюдений. Получены 22- и 11-летние циклы движения Солнца и устойчивые изменения параметров орбиты Земли.

*Ледниковые периоды, Солнечная система, уравнения движения, циклы движения Солнца, изменение эклиптики*

### ORBITS OF THE EARTH AND SUN AND POSSIBLE EFFECTS ON THE EARTH CRYOSPHERE (Statement of a problem and first results)

V. P. Melnikov, J. J. Smulsky, O. I. Krotov, L. J. Smulsky

*Earth Cryosphere Institute, SB RAS, 625000, Tyumen, 1230, Russia*

The researches of the last years cast doubt upon the exactness of conclusions of the astronomical theory of ice ages. To test them, the problem of gravitational interaction of the Solar system bodies is solved and the movements of the Sun and Earth during a few hundreds years are analysed. The results of solution are confirmed by data of observations. We have obtained 22- and 11-years motion cycles of the Sun and stable changes of the Earth's orbit parameters.

*Ice ages, Solar system, equations of movement, cycles of the Sun motion, change in ecliptic*

## ВВЕДЕНИЕ

Одной из наиболее вероятных причин периодического наступления ледниковых периодов является изменение параметров орбиты Земли. В 1920-х годах Милутин Миланкович (см. например [Имбри Дж., Имбри К., 1988]) показал, что изменение эксцентриситета, наклона оси вращения и прецессия точек равноденствия приводят к периодическим изменениям инсоляции. Он основывался на результатах 1843 г., полученных Урбеном Лаверье по приближенному решению задачи о движении планеты Земля под воздействием Солнца и остальных планет. Результаты У. Лаверье по Меркурию в течение XX в. обсуждались в связи с обоснованием общей теории относительности, и в последнее время было установлено следующее несоответствие. Рассчитанная У. Лаверье прецессия перигелия Меркурия равнялась 530'' в столетие и, как считалось, расходилась на 40'' с наблюдаемой величиной. В

настоящее время астрономами принято, что прецессия перигелия составляет 5600'' в столетие, что на порядок отличается от расчета У. Лаверье [Кауфман, 1981; *Астрономический ежегодник, 1947; Справочное руководство...*, 1976]. Не меньшая величина погрешности может быть и для параметров орбиты Земли.

В работе И. И. Смульского [1999] точно решена задача о движении нескольких симметрично расположенных тел. В результате установлено, что при таком взаимодействии движение каждого тела происходит по стабильной в пространстве орбите. Например, в случае эллиптической орбиты, ее плоскость, эксцентриситет и положение перигелия не изменяются. В то же время, все приближенные методы, в том числе и примененный У. Лаверье, будут давать изменяющуюся орбиту.

## МЕТОД РЕШЕНИЯ

Два вышеотмеченных обстоятельства обуславливают необходимость более точного решения задачи движения тел Солнечной системы. В связи с этим была разработана программа Galactica [Смульский, 1999]. Сила воздействия тела массой  $m_k$  на тело массой  $m_i$  определяется законом всемирного тяготения

$$\vec{F}_{ik} = -G \frac{m_i m_k}{r_{ik}^3} \cdot \vec{r}_{ik}, \quad (1)$$

где  $\vec{r}_{ik}$  — радиус-вектор от массы  $m_k$  до массы  $m_i$ ;  $G$  — гравитационная постоянная.

Тогда ускорение каждого из  $n$  тел в соответствии со вторым законом механики запишется

$$\frac{d^2 \vec{r}_i}{dt^2} = -G \sum_{k \neq i}^n \frac{m_k \vec{r}_{ik}}{r_{ik}^3}, \quad (2)$$

где  $\vec{r}_i$  — радиус-вектор  $m_i$  относительно центра масс Солнечной системы.

Система уравнений (2) приведена к безразмерному виду. При этом время отнесено к длительности юлианского года  $t_y = 365,25636042$  дней. Чтобы приведенное время отсчитывалось в юлианских столетиях, линейные размеры отнесены к величине  $Am = 73,4$  а.е. (астрономическая единица), которая близка к диаметру орбиты Плутона.

Решение системы  $n$  дифференциальных нелинейных уравнений второго порядка определяет проблему гравитационного взаимодействия  $n$ -тел. В литературе [Сербуленко, 1996] существуют разные подходы к решению этой задачи. Представленный в работе И. И. Смульского [1999] метод позволяет рассматривать как движение отдельных тел, так и поведение их совокупности. В разработанной программе при сближении тел на расстояние, равное сумме их радиусов, они объединяются в одно тело, которое приобретает тепловую энергию и собственный момент количества движения. В программе контролируются интегральные величины: масса, количество движения  $P$ , момент количества движения  $M$ , сумма собственных моментов количества движения  $S$ , кинетическая  $E$  и тепловая  $E_t$  энергии всей совокупности тел. Задача решается в системе центра масс, поэтому количество движения системы должно быть равно нулю. Если его значение не равно нулю, то это свидетельствует о погрешности счета. Момент количества движения системы тел в процессе движения системы не изменяется, поэтому какое-либо его изменение также свидетельствует о погрешности решения задачи. Остальные интегральные параметры системы тел характеризуют развитие системы.

Для интегрирования уравнений движения  $n$ -тел необходимо задать их положения и скорости в начальный момент времени. В случае модельной задачи это не составляет проблемы, но при рассмотрении движения Солнечной системы положения и скорости небесных тел не произвольные, а должны соответствовать их реальным положениям и скоростям. Ввиду отсутствия у авторов таких данных задание начальных условий для Солнечной системы значительно затруднено.

В астрономических ежегодниках публикуются расчетные значения положений планет и Луны на определенную дату. По-видимому, это единственные доступные данные, которыми можно воспользоваться. Так как в ежегодниках для всех планет и на все даты приводятся геоцентрические сферические координаты планет (прямое восхождение, склонение и геоцентрический радиус), то для получения их декартовых координат относительно центра масс Солнечной системы необходимо выполнять сложные вычисления. Еще большей проблемой является определение скорости небесных тел на данный момент времени. В этом случае требуется знать их массы, параметры орбит и их изменение во времени. Некоторые из этих величин имеют разные значения в различных источниках. Например, масса Плутона отличается в несколько раз. В связи с вышеперечисленным, подготовка начальных данных для Солнечной системы представляет собой достаточно сложную задачу, пути решения которой и конечные результаты могут быть разными.

Мы рассмотрели несколько вариантов расчета данных, в том числе для разных моментов времени: 1949, 1984 и 1994 гг. Задав начальные положения в один момент времени, например 30.12.1949 г., можно решать уравнения движения до другого момента, а затем сопоставить рассчитанные положения планет с полученными из ежегодника.

После запуска программы, через определенное число шагов интегрирования уравнений, на экран дисплея выдается численная информация о процессе интегрирования и картина положения планет с векторами скорости (рис. 1). Эти данные позволяют наблюдать процесс решения и качественно определять его точность. Координаты и скорости конкретного тела записываются в файл, и после завершения работы программы можно анализировать характерные особенности его движения.

На первом этапе проводились работы по отладке исходных данных. По начальным данным на 30.12.1949 г. (юлианский день  $JD = 2433280,5$ ) рассчитывались положения планет на 21.01.1984 г. ( $JD = 2445720,5$ ) и сравнивались

1.002E-08 9.987E-01 1.526E+01 1.000E+00 -3.469E-18 4.770E-18 -8.674E-19 1.097E-05  
 -1.608E-04 3.794E-04 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 4.304E-03 4.304E-03 0 1  
 1.00180098577946E-005 2

Юпитер

Значения параметров

 $T, m_{\max}, v_{\max}, \bar{m}, P_x, P_y, P_z, M_x, M_y, M_z, S_x, S_y, S_z, E, E_{\max}, E_t, Lt, dT, Mu$ 


Рис. 1. Представление на экране дисплея (вид с Южного полюса) результатов численного решения системы уравнений (2).

Курсивом даны пояснения и расшифровка числовых параметров

со значениями, взятыми из ежегодника. Использовались две группы начальных данных: первую рассчитывали авторы по данным из ежегодника, а дополнительные параметры планет использовались из других источников; второй группой начальных данных являлись координаты и скорости планет, полученные Лабораторией реактивного движения (ЛРД) США [Справочное руководство..., 1976]. Сопоставив результаты решения задачи с данными 1984 г., авторы остановились на начальных данных второй группы. Их недостатком является представление параметров Земли в системе центра тяжести Земля—Луна, поэтому авторы дополнили их начальными данными для Луны. На рис. 2 сопоставлены координаты планет и Луны, рассчитанные по программе Galactica, с данными 1984 г. по ежегоднику; даны гелиоцентрические экваториальные координаты (ось  $x$  направлена на точку весеннего равноденствия 1950 г.; ось  $z$  параллельна оси вращения Земли). Лучше согласуются координаты  $x$  и  $y$ , которые лежат в плоскости экватора. При этом более точное совпадение имеет место для дальних планет. Отличие координаты для Земли, по-видимому, обусловлено неточными исходными данными; расхождения для Луны — отклонениями Земли.

При сопоставлении рассчитанных данных за одну эпоху с данными другой эпохи должно быть учтено смещение осей координат и момента времени наступления весеннего равноденствия, которые обусловлены вековыми изменениями то-

чек весеннего равноденствия. При рассмотренном выше сопоставлении эти детали полностью не учтены, поэтому частично отличие может быть вызвано этими обстоятельствами. Точность работы программы, как авторы убедились при решении модельных задач по движению осесимметрично расположенных тел, определяется изменением момента количества движения системы. За время решения задачи, равное 34,06 года, относительное изменение момента количества движения составило  $5,8 \cdot 10^{-12}$ , т. е. чрезвычайно малую величину. Поэтому отличие положений планет за две рассмотренные даты должно быть значительно меньше, чем представлено на рис. 2. Это несоответствие может быть обусловлено следующими обстоятельствами:

- 1) несоответствием принятых исходных данных действительным положениям и скоростям планет;
- 2) погрешностью определения масс тел Солнечной системы;
- 3) погрешностью пространственно-временного перехода между разными датами;
- 4) наличием неучтенных тел в Солнечной системе.

Так как отличия результатов решения уравнений движения от астрономических данных всегда будут вызывать сомнение в справедливости последующих выводов, поэтому исследования погрешностей в дальнейшем необходимо продолжать.

$x_2, y_2, z_2, vx_2, vy_2, vz_2$  – 1984 г. из 1949 г. по американским данным относительно центра масс 1950 г.,  $xe_2, ye_2, ze_2$  – 1984 г. из ежегодника в системе 1950 г.

$ae = 1.496 \cdot 10^{11}$

$Am = 1.097960568600187 \cdot 10^{33}$

$\Delta T = 34.06023271752587$

$M2x = 1.096951 \cdot 10^{-5} \quad dMx = -2.36286 \cdot 10^{-15}$

$M2y = -1.60843 \cdot 10^{-4} \quad dMy = 4.017213 \cdot 10^{-15}$

$M2z = 3.793725 \cdot 10^{-4} \quad dMz = -2.18759 \cdot 10^{-15}$

Меркурий  
Венера  
Земля  
Марс  
Юпитер  
Сатурн  
Уран  
Нептун  
Плутон  
Луна  
Солнце

$x_2$
$-5.225287146375019 \cdot 10^{-3}$
$-8.162977303401811 \cdot 10^{-3}$
$-5.471350394315345 \cdot 10^{-3}$
$-2.249329036879681 \cdot 10^{-2}$
$-6.657067301082932 \cdot 10^{-3}$
$-0.103449655603639$
$-9.053339078711108 \cdot 10^{-2}$
$-9.540503243531682 \cdot 10^{-3}$
$-0.338087784473531$
$-5.437660696409383 \cdot 10^{-3}$
0

$ae \cdot x_{e_2}$

Am
$-5.367432881124506 \cdot 10^{-3}$
$-8.474776477504198 \cdot 10^{-3}$
$-6.63427613733592 \cdot 10^{-3}$
$-2.249844075137744 \cdot 10^{-2}$
$-6.883890930287378 \cdot 10^{-3}$
$-0.10354176939609$
$-9.064069042741672 \cdot 10^{-2}$
$-9.586734078637846 \cdot 10^{-3}$
$-0.338121767408557$
$-6.663576438469816 \cdot 10^{-3}$
0

$y_2$

$ae \cdot y_{e_2}$   
Am

$-2.408836888977144 \cdot 10^{-3}$
$-5.193732628192051 \cdot 10^{-3}$
$1.122607573871168 \cdot 10^{-2}$
$1.477546938310558 \cdot 10^{-4}$
$-6.586824137814742 \cdot 10^{-2}$
$-8.023612030444532 \cdot 10^{-2}$
$-0.222450864856414$
$-0.381535924263311$
$-0.223509804840047$
$1.122815397798076 \cdot 10^{-2}$
0

$-1.713843767497908 \cdot 10^{-3}$
$-4.742817318693928 \cdot 10^{-3}$
$1.068929024925094 \cdot 10^{-2}$
$4.569912748685523 \cdot 10^{-4}$
$-6.586138088018372 \cdot 10^{-2}$
$-8.012948234759131 \cdot 10^{-2}$
$-0.222439208642414$
$-0.381550926308856$
$-0.223481541156649$
$1.07016559012164 \cdot 10^{-2}$
0

$z_2$

$ae \cdot z_{e_2}$   
Am

$-7.534691266076558 \cdot 10^{-4}$
$-1.825232239078354 \cdot 10^{-3}$
$4.867830536178361 \cdot 10^{-3}$
$6.708299647263188 \cdot 10^{-4}$
$-2.809289720554336 \cdot 10^{-2}$
$-2.870969963028123 \cdot 10^{-2}$
$-9.618806728285359 \cdot 10^{-2}$
$-0.1560527813254$
$3.183439765267401 \cdot 10^{-2}$
$4.865765934491502 \cdot 10^{-3}$
0

$-3.663366578675938 \cdot 10^{-4}$
$-1.60233076698097 \cdot 10^{-3}$
$4.634905246631944 \cdot 10^{-3}$
$8.128831084871146 \cdot 10^{-4}$
$-2.808438925936374 \cdot 10^{-2}$
$-3.002408150415465 \cdot 10^{-2}$
$-9.618072180373018 \cdot 10^{-2}$
$-0.156058296536507$
$3.185313662455878 \cdot 10^{-2}$
$4.642409366144357 \cdot 10^{-3}$
0

Рис. 2. Сопоставление рассчитанных координат планет  $x_2, y_2, z_2$  с координатами, взятыми из Астрономического ежегодника (гелиоцентрическая экваториальная система координат).

### ДВИЖЕНИЕ СОЛНЦА

В процессе выполнения вышеприведенных расчетов авторы обратили внимание на движение Солнца. Ниже рассмотрим некоторые его особенности. На рис. 3 показана траектория Солнца в пространственной системе координат. Так как в приведенных единицах диаметр Солнца  $d_c = 1,27 \cdot 10^{-4}$ , то из рис. 3 видно, что Солнце движется в области двух своих диаметров. Размер его орбиты составляет примерно 0,01 от диаметра орбиты Земли, поэтому влияние движения Солнца будет ощутимо для Земли и внутренних планет.

Траектория Солнца в средней плоскости, которая наклонена к плоскости экватора под углом  $24,8^\circ$ , показана на рис. 4. С 1949 г. Солнце начинает движение к центру масс Солнечной системы, проходит на небольшом расстоянии от него и продолжает движение по циклической

траектории. Средний период одного оборота Солнца вокруг центра масс составляет  $T_{2\pi} = 11,3$  года. Интересно отметить, что эта величина совпадает с периодичностью солнечных пятен и с малым климатическим периодом на Земле.

Траектория Солнца незамкнутая и отличается от эллиптических траекторий планет. Она состоит из двух овалов: большого и малого. Если за начало периода взять точку  $A$ , где малый овал пересекается с большим, а за конец точку  $B$ , где большой пересекается с малым, то длительность такого периода составит 23,2 года. При этом относительно центра  $O$  Солнце проходит угловое расстояние 11,8 рад. Для завершения полных двух оборотов, чтобы точка  $B$  совпадала с точкой  $A$ , недостает угла  $\angle BOA \approx 45^\circ$ . Поэтому двуховальная траектория Солнца будет прецессировать за стрелкой часов, т.е. навстречу движению Солнца. Следует отметить, что период двуховальной траектории в другую эпоху,

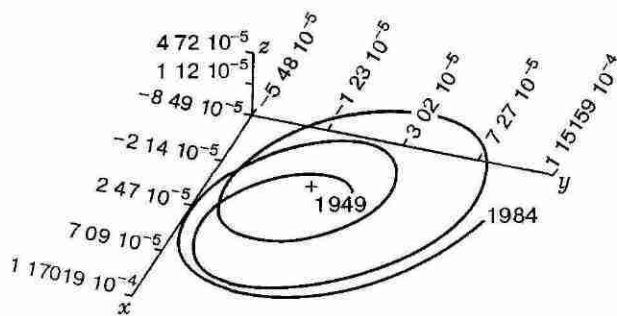


Рис. 3. Пространственная траектория Солнца за 34 года относительно центра масс Солнечной системы, отмеченного крестиком.

например с 1975 г. по 1996 г., составляет 21 год. Поэтому среднее значение этого периода совпадает с 22-летним периодом солнечной активности. Возможно, прохождение Солнца между двумя точками малой и большой кривизны траектории приводит к изменению физических процессов на Солнце за счет инерционных сил. На этом же графике представлена проекция траектории в плоскости  $xz$ . Выход траектории из средней плоскости  $xy$  составляет 5%. В этой плоскости Солнце также увлекает Землю.

Путь Солнца за 151 год, с 1949 г. по 2100 г., показан на рис. 5. Характер орбиты остается подобным представленному на рис. 4. Положениями Солнца постепенно заполняется все пространство круга радиусом приблизительно равным одному диаметру Солнца. Подобные

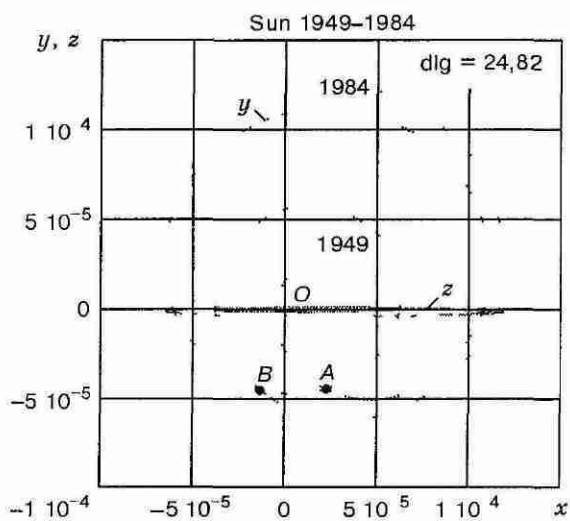


Рис. 4. Траектория Солнца в средней плоскости  $xy$  и в перпендикулярной плоскости  $xz$  (расстояние между соседними точками 0,05 года).

траектории наблюдаются и при расчете с 1949 г. по 1798 г. Следует отметить особенность в траектории Солнца. Его движения происходят вокруг центра масс Солнечной системы. Однако в 1990 г. Солнце проскакивает мимо центра масс. Такой же проскок наблюдается в 1810 г. Возможно, что при таких проскоках Солнца мимо центра масс Солнечной системы на него будут оказывать наибольшее влияние инерционные и приливные силы.

На рассчитанную нами траекторию (см. рис. 5) прерывистой линией наложена траектория Солнца с 1950 г. по 2000 г., которая получена расчетом центра масс Солнечной системы по эфемеридам планет [Чечельницкий, 1980; Wood R., Wood K., 1965]. График траектории Солнца сосканирован из работы А. М. Чечельницкого [1980]. Как видим, траектории за общий период 1950—2000 гг. практически совпадают. Возможно, что небольшие расхождения между прерывистой линией и нашими точками, например в 1984 г. и 1994 г., обусловлены неточностью изображения траектории на рисунке, либо отличиями в принятых системах координат. Если на

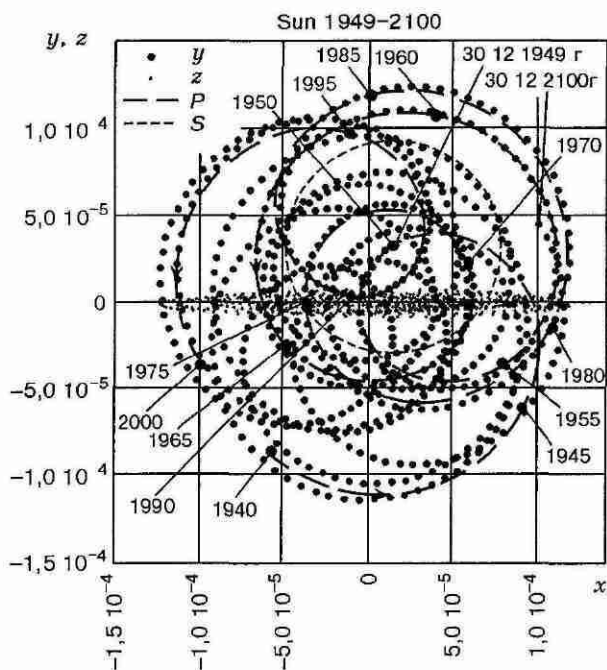


Рис. 5. Траектория Солнца в средней плоскости  $xy$  и в перпендикулярной плоскости  $xz$  с 30.12.1949 г. по 30.12.2100 г. (расстояние между точками 0,2 года). Прерывистой линией  $P$  сопоставлена траектория Солнца с 1940 г. по 2000 г. по эфемеридным данным [Чечельницкий, 1980]. Пунктирной окружностью  $S$  показано положение Солнца в начале 1950 г.

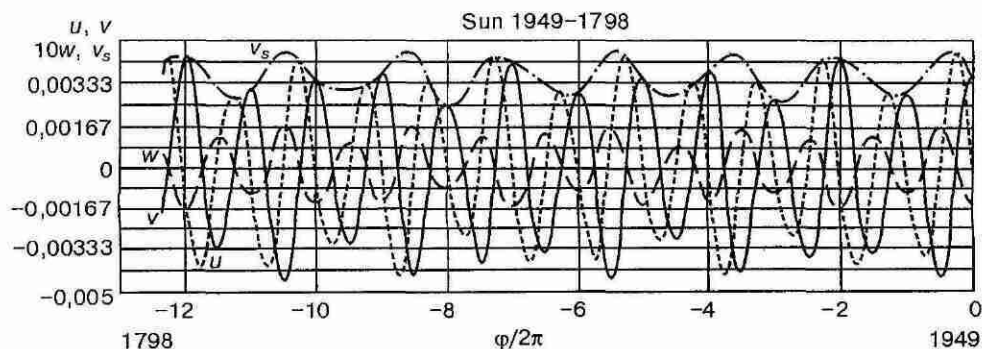


Рис. 6. Три проекции скорости Солнца:  $u$  — на ось  $x$ ,  $v$  — на ось  $y$  и  $w$  — на ось  $z$  (с увеличением в 10 раз) и модуль скорости  $v_s$  в зависимости от числа оборотов  $\varphi/2\pi$  вектора скорости в средней плоскости.

рис. 2 представлено дифференцированное подтверждение справедливости нашего метода по всем телам, то рис. 5 является подтверждением справедливости метода по интегрированному результату.

Перейдем от рассмотрения траектории Солнца к его скорости. Безразмерные компоненты скорости и полная скорость показаны на рис. 6 в зависимости от числа оборотов вектора скорости в средней за 151 год плоскости орбиты Солнца. Здесь скорости умножены на коэффициент  $k_v = \sqrt{A_m/(G \cdot m)} = 2,87 \cdot 10^{-4}$  с/м, где  $m$  — масса Солнечной системы, а полярный угол вектора скорости определяется так:  $\varphi = \arctg(v/u)$ .

Среднему за 151 год значению  $\varphi/2\pi = 1$  соответствует время 11,85 лет. Как видно из графика, изменение скоростей происходит по квазигармоническому закону с этим же периодом. Так как сидерический (относительно неподвижных звезд) период обращения Юпитера  $T_J = 11,9$  лет, то основная гармоника скорости Солнца обусловлена взаимодействием Солнца и

Юпитера. Из рис. 6 видно, что максимумы скоростей периодически изменяются с периодом большим, чем  $T_J$ . Он совпадает с периодом обращения Сатурна  $T_S = 29,4$  лет. Поэтому скорость Солнца в первом приближении можно разложить на гармоники по периодам этих планет. Например, для составляющей скорости по оси  $y$  аппроксимация будет иметь вид:

$$v = 0,003 \cos\left(2\pi \frac{t + 0,04}{T_J}\right) + 0,0012 \cos\left(2\pi \frac{t - 0,04}{T_S}\right), \quad (3)$$

где  $t$  — время в годах. Модуль скорости Солнца за рассмотренный период не превышает 15,7 м/с.

На рис. 7 показано изменение полной скорости Солнца  $v_s$  и кинетической энергии  $E$  Солнечной системы относительно ее центра масс. Модуль полной скорости дан волнистой линией, которая указывает на пульсации скорости Солнца. Небольшой их период обусловлен воздействием внутренних планет на скорость Солнца.

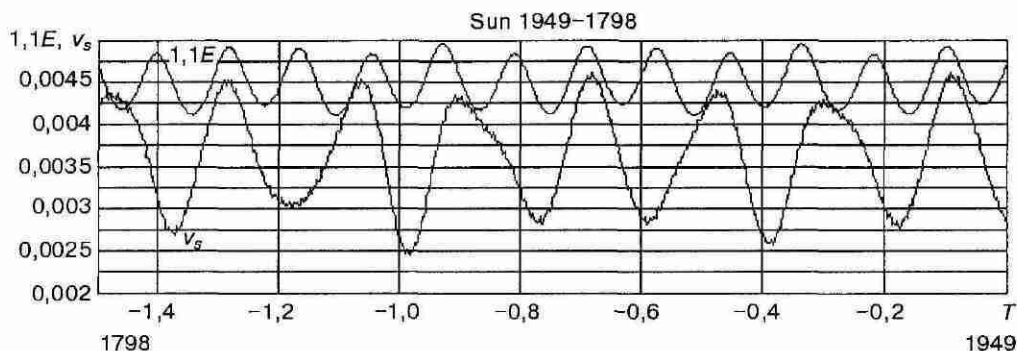


Рис. 7. Полная скорость  $v_s$  Солнца и кинетическая энергия  $E$  Солнечной системы в зависимости от времени.

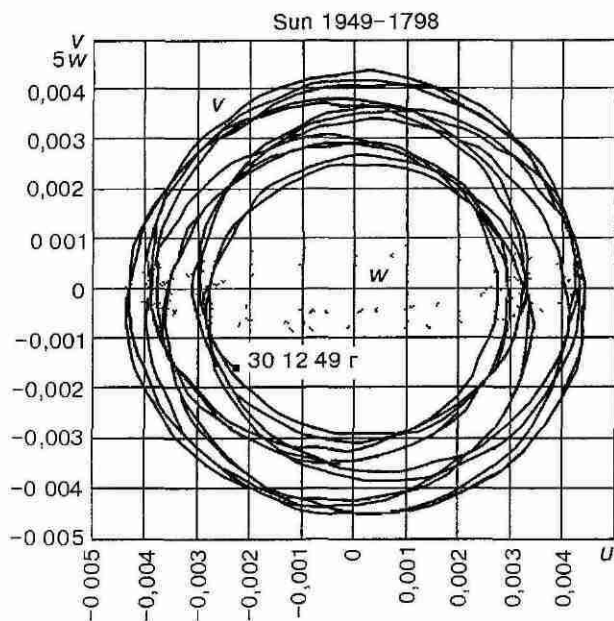


Рис. 8. Годограф вектора скорости Солнца в средней плоскости орбиты (линия) и в перпендикулярной плоскости (точки; с увеличением в 5 раз).

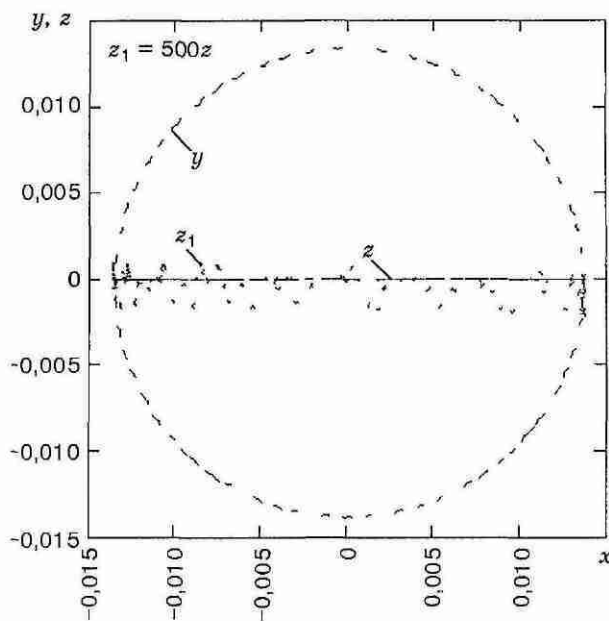


Рис. 9. Орбиты Земли в средней за 34 года плоскости  $ux$  и в перпендикулярной плоскости  $zx$ .

Период полной скорости изменяется от 14,7 до 19,4 года. Величина максимумов скорости также периодически изменяется. Изменение кинетической энергии Солнечной системы происходит по квазигармоническому закону с периодом 11,9 лет, равным периоду обращения Юпитера вокруг Солнца.

Линии годографа вектора скорости (рис. 8) заполняют кольцевую область, радиус которой изменяется от минимальной скорости до максимальной. Средний за 151 год период полного оборота вектора скорости равен 11,85 лет.

### ДВИЖЕНИЕ ЗЕМЛИ

Траектория Земли в средней ее плоскости ( $y, x$ ) показана на рис. 9. Она наклонена к плоскости экватора на угол  $23,4^\circ$ . Один оборот Земли отражается 20 точками на графике. Так как юлианский год не совпадает с периодом оборота Земли, то точки с каждым оборотом смещаются. Поэтому 34 года отмечены 34 точками в 20 группах. Эти точки в каждой группе показывают колебательный характер смещения орбиты Земли в пространстве, который обусловлен движением Солнца. Другими словами, Солнце при движении по своей орбите увлекает с собой Землю, а также другие планеты. Это подобно движению Земли, которая увлекает Луну при своем орбитальном движении. На этом же

графике показаны орбиты Земли в плоскости  $zx$  в обычном и увеличенном в 500 раз ( $z_1x$ ) масштабе. Видны небольшие периодические колебания плоскости орбиты Земли. Они также обусловлены движением Солнца. Приведенные примеры показывают, что движение Солнца может оказывать влияние на орбиту Земли даже в течение короткого периода.

Однако изменение освещенности земной поверхности обусловлено движением Земли относительно Солнца, а не относительно центра масс Солнечной системы. На рис. 10 представлены орбиты Земли относительно Солнца за этот же период. В плоскости  $ux$  точки орбит ложатся на плавную кривую, т. е. относительно Солнца орбита Земли в пространстве не смещается. Здесь же представлены орбиты Земли в перпендикулярной плоскости  $zx$ . В этом масштабе плоскости орбит проецируются в прямую линию. Однако увеличение координаты  $z$  в 10 000 раз (см.  $z_1(x)$  на рис. 10) позволяет увидеть все 34 орбиты вследствие того, что они поворачиваются вокруг оси  $x$ . Таким образом, орбита Земли в течение 34 лет медленно изменяет наклон к плоскости экватора.

С целью изучения изменения орбиты Земли были выполнены расчеты движения тел Солнечной системы в интервалах  $7,52 \leq T \leq 1,52$  от 30.12.1949 г., т. е. за 904 года. При этом в 11 промежутках выдавались траектории Земли и

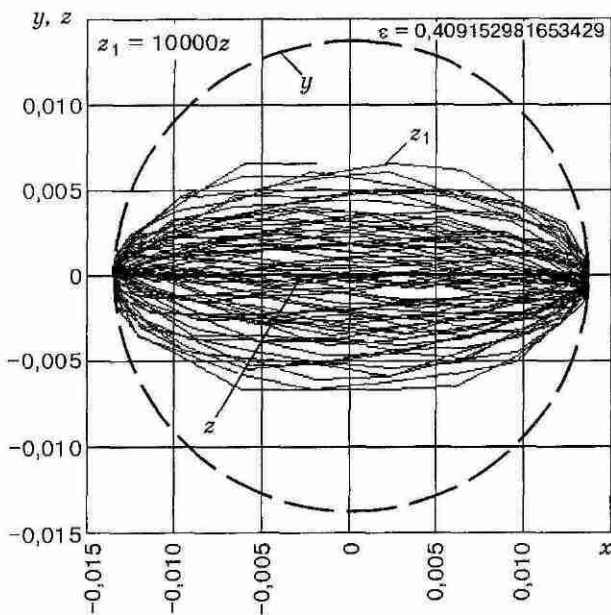


Рис. 10. Орбиты Земли относительно Солнца в средней за 34 года плоскости  $yx$  и в перпендикулярной плоскости  $zx$ .

Солнца с дискретностью 500 точек на один год. Такая траектория за 1950 г. в средней ее плоскости представлена на рис. 11. Здесь же нанесена окружность  $C$  с радиусом, близким к радиусу перигелия Земли. Видно, что перигелий расположен в области полярного угла  $\varphi = \pi/2$ , где Земля находится зимой. На этом же графике представлена увеличенная в 10 000 раз проекция траектории в перпендикулярной плоскости ( $zx$ ). В таком масштабе видно, что орбита Земли не замыкается. Наблюдается 13 колебательных отклонений Земли от средней плоскости, которые обусловлены ее взаимодействием с Луной (для улучшения изображения плоскость координат  $zx$  отклонена от средней плоскости на  $2,4 \cdot 10^{-5}$  рад). Об этом свидетельствует период колебаний и амплитуда, равная  $0,5 \cdot 10^{-8}$  (диаметр земной орбиты при ее движении относительно совместного с Луной центра тяжести равен  $5 \cdot 10^{-7}$ ). Анализ колебаний показал, что часть из них относительно гладкие, а часть имеют пульсации. Как видно из графика, в 1950 г. эти короткопериодические вибрации Земли происходят в январе, июне—июле и декабре. Они наблюдаются каждый год двумя сериями по три колебания в каждой. Положения серий со временем смещаются по месяцам. По-видимому, вибрации Земли происходят при определенном положении Луны относительно Солнца.

С помощью таких детальных траекторий, как представленная (см. рис. 11), были определены угол наклона плоскости орбиты Земли  $\epsilon$  к плоскости экватора 1950 г., угловое расстояние восходящего узла земной орбиты  $\varphi_0$  от точки равноденствия 1950 г., радиусы перигелия  $R_p$  и апогелия  $R_a$ , угловое положение перигелия  $\varphi_p$  и время прохождения его  $t_p$ , которые представлены в таблице.

Расчитанные углы наклона плоскости орбиты  $\epsilon$  сопоставлены (рис. 12) с аппроксимационной зависимостью  $\epsilon_a$ , установленной на основе всей истории астрономических наблюдений [Справочное руководство..., 1976]:

$$\epsilon_a = 23^{\circ}27'08'',26 - 46'',845T_0 - 0'',0059 T_0^2 + 0'',00181 T_0^3, \quad (4)$$

где  $T_0 = T + 0,49$ .

Они совпадают до четвертого знака включительно. В течение 900 лет угол наклона плоскости орбиты практически линейно уменьшается в соответствии с зависимостью

$$\epsilon = 0,40931976 - 2,271995 \cdot 10^{-4} T, \quad (5)$$

где  $\epsilon$  представлено в радианах.

Если линейную зависимость (5) продлить в будущее, то через 180 тыс. лет будет достигнуто значение  $\epsilon = 0$ . То есть ось вращения Земли будет перпендикулярна плоскости орбиты. При

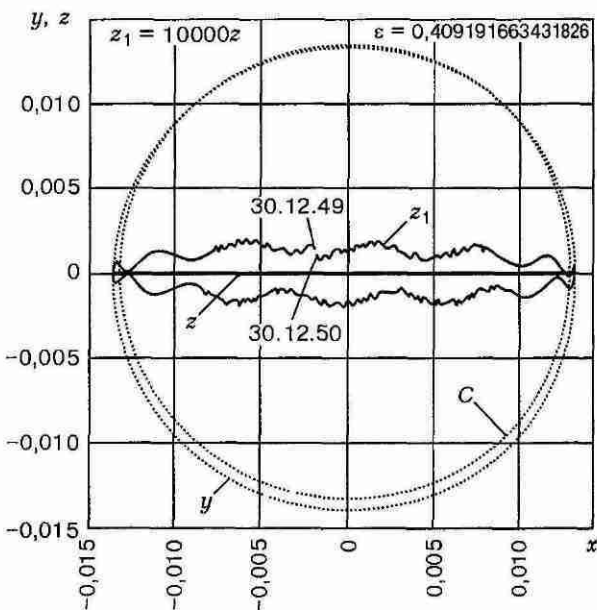


Рис. 11. Орбита Земли относительно Солнца в средней за 1950 г. плоскости  $yx$  и в перпендикулярной плоскости  $zx$ .  $C$  — окружность с центром в начале координат.



этом сезонов года не будет. В экваториальных и средних широтах будут благоприятные для жизни климатические условия. Однако в полярных широтах начнут скапливаться льды, которые будут сползать в средние широты.

При продлении зависимости (5) в прошлое 511 тыс. лет назад ось вращения Земли будет лежать в плоскости орбиты. Это означает, что на полюсах часть года, в течение многих суток, будет длиться тропический день, а часть года — полярная ночь в течение такого же времени. По-видимому, при таком положении Земли ледниковые покровы не смогут сформироваться в полярных широтах.

Из рис. 12 видно, что аппроксимационная зависимость (4) ограничивает изменение угла наклона плоскости орбиты в пределах  $0,395 \leq \epsilon_a \leq 0,423$  в течение времени в столетиях  $100 \geq T \geq -100$ . Однако аппроксимационная зависимость (4) основана на наблюдениях за  $\sim 2,5$  тыс. лет, поэтому продолжение ее за границы этого периода приводит к все возрастающим погрешностям: с увеличением  $|T|$  угол наклона, согласно (4),  $|\epsilon_a| \rightarrow \infty$ .

Подтверждение рассчитанных значений  $\epsilon$  наблюдаемыми свидетельствует о необходимости продления расчетов до  $T = \pm 10$  тыс. лет, которые покажут дальнейшую тенденцию изменения угла наклона плоскости орбиты.

Следует отметить один важный вывод в отношении положения оси вращения Земли. Наблюдаемые величины  $\epsilon_a$  являются углами между плоскостью экватора и плоскостью орбиты Земли. В расчетах мы получили  $\epsilon$  как угол изменения плоскости орбиты относительно фиксированных координат, связанных с плоскостью экватора 1950 г. Поэтому совпадение рассчитанных значений  $\epsilon$  с наблюдаемыми свидетельствует, что в течение 900 лет угловое положение плоскости экватора не изменяется, т. е. ось вра-

щения Земли не имеет тенденции к изменению наклона.

На рис. 13 изображены изменения за 900 лет положения восходящего узла  $\varphi_0$  и эксцентриситета орбиты  $e$ . Восходящий узел Земной орбиты  $\varphi_0$  движется в направлении обращения Земли с некоторым ускорением. Средняя за 900 лет скорость прецессии орбиты Земли составляет  $\dot{\varphi}_0 = 4,147 \cdot 10^{-7}$  рад/год. Известно [Справочное руководство..., 1976; Астрономический ежегодник, 1982], что движение восходящего узла (точки весеннего равноденствия) направлено против обращения Земли, и годичная его прецессия по долготе в год определяется параметром  $p = -(50'',25641 + 0'',02223T_0)$ , что на 1949 г. составит величину  $-0,0002437$  рад/год. Эта величина обусловлена относительным поворотом плоскости экватора и плоскости эклиптики. Как видим, она значительно превосходит по величине абсолютную прецессию орбиты Земли и обратна ей по знаку. Таким образом, движение точки весеннего равноденствия обусловлено абсолютной прецессией плоскости экватора, т. е. прецессией земной оси. Период прецессии оси Земли равен  $2\pi/0,0002437 = 25778$  лет.

Радиус перигелия  $R_p$  (см. таблицу) растет, а радиус апогелия  $R_a$  со временем уменьшается. Это приводит к уменьшению со временем эксцентриситета орбиты  $e$ . Изменения  $R_p$  и  $R_a$  сопоставимы с размером земной орбиты относительно центра масс Земля—Луна. Это приводит к погрешностям определения перигелия и апогелия, которые дают зигзагообразный характер изменения этих параметров. Эксцентриситет орбиты рассчитывался по формуле

$$e = \frac{R_a/R_p - 1}{R_a/R_p + 1}. \quad (6)$$

Изменение параметров орбиты Земли за 900 лет от 30.12.1949 г.

$T$	$\epsilon$	$\varphi_0$	$R_p$	$R_a$	$\varphi_p$	$t_p$
1,515	0,408864	1,82518e - 4	0,0133994	0,0138618	1,76598	1,0900
0,005	0,409202	9,11836e - 5	0,0133972	0,0138619	1,77300	0,9901
-1,515	0,409536	6,50196e - 6	0,0133972	0,0138619	1,73170	0,9200
-2,265	0,409718	-2,59641e - 5	0,0133959	0,0138639	1,72808	0,8800
-3,015	0,409889	-5,40909e - 5	0,0133967	0,0138645	1,73783	0,8550
-3,765	0,410044	-8,87832e - 5	0,0133956	0,0138643	1,72181	0,8150
-4,515	0,410220	-1,15810e - 4	0,0133946	0,0138648	1,71919	0,7900
-5,265	0,410396	-1,34767e - 4	0,0133954	0,0138657	1,71690	0,7350
-6,015	0,410570	-1,55718e - 4	0,0133944	0,0138651	1,72792	0,7000
-6,765	0,410744	-1,74845e - 4	0,0133941	0,0138661	1,75226	0,6600
-7,515	0,410918	-1,91983e - 4	0,0133941	0,0138663	1,73795	0,6200

Примечание.  $T$  — в столетиях.

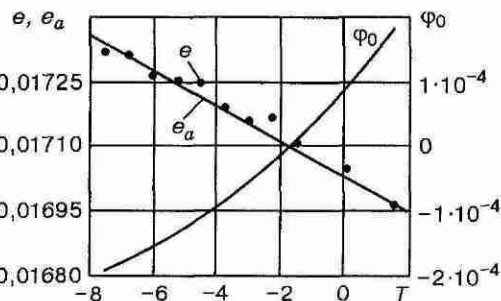
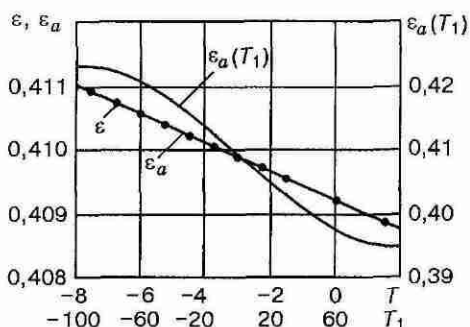


Рис. 12. Изменение угла наклона плоскости орбиты Земли (плоскости эклиптики) за 900 лет ( $\epsilon$  — расчет;  $\epsilon_a$  — аппроксимация наблюдений).

Рис. 13. Изменение положения восходящего узла орбиты Земли  $\varphi_0$  и ее эксцентриситета  $e$  за 900 лет ( $e$  — расчет;  $e_a$  — аппроксимация наблюдений).

Так как эксцентриситет определяется  $R_p$  и  $R_a$ , то погрешности их определения приводят к разбросу  $e$ . Тем не менее, рассчитанные значения  $e$ , как видно из рис. 13, согласуются с тенденцией изменения в соответствии с

$$e_a = 1,675104 \cdot 10^{-2} - 4,18 \cdot 10^{-5} T_0 - 1,26 \cdot 10^{-7} T_0^2 + 0,03 \cdot 10^{-2}. \quad (7)$$

Зависимость (7) является аппроксимационной [Справочное руководство..., 1976], сдвинутой на величину  $0,03 \cdot 10^{-2}$ . Причина отличия абсолютной величины эксцентриситета заключена в погрешности начальных данных для Земли, взятых, как уже отмечалось, согласно данным ЛРД США.

Положение перигелия  $\varphi_p$  относительно восходящего узла  $\varphi_0$ , как видно из таблицы, в течение 900 лет изменяется в пределах  $2,5^\circ$ . Однако устойчивая тенденция изменения не просматривается. Необходим более длительный промежуток времени для получения определенных результатов.

Представленное в таблице время наступления перигелия  $t_p$  в годах, которое отсчитывается от начала года (значения, превышающие 1, означают переход на начало следующего года), показывает, что перигелий движется к концу года со средней за 900 лет скоростью  $\dot{t}_p = 5,205 \cdot 10^{-4}$  в год. Это в основном обусловлено несоответствием юлианского года, к которому нормировано время в уравнениях движения, длительности оборота Земли по орбите. За 34 года получено, что средний оборот Земли по орбите происходит за  $1,000477$  часть юлианского года, т. е. для завершения года не хватает  $4,77 \cdot 10^{-4}$  года. Эта величина близка к скорости вращения перигелия  $\dot{t}_p$ .

Полученные за небольшой период времени особенности движения Солнца и Земли дают основание для продолжения исследования этих движений за более длительный период. Рассмотренные короткопериодические движения Солнца могут быть ответственными за периодические процессы, происходящие на нем. В последние годы в литературе широко исследуется взаимосвязь между возникновением солнечных пятен и процессами в магнитосфере и верхней атмосфере Земли. Исследуется также зависимость погодных явлений и климата от процессов, протекающих на Солнце. Поэтому полученные короткопериодические результаты также представляют интерес для дальнейших исследований. Необходимо рассмотреть инерционные силы, обусловленные движением Солнца, сопоставить параметры движения Солнца с наблюдаемыми 11-летними климатическими циклами. Возможно, при рассмотрении движения Солнца за более длительный период выявятся другие циклы.

Периодические движения Солнца могут способствовать периодическим изменениям его активности, а изменения орбиты Земли — вариации ее инсоляции. Отмеченные факторы могут обуславливать ритмический характер криосферных процессов в пределах нескольких десятков лет.

После изучения движения Солнца следует рассмотреть движение Земли. Для изучения поведения орбиты Земли за большие временные интервалы требуется существенное увеличение точности расчетов. По вычисленным изменениям орбиты может быть рассчитано изменение инсоляции Земли. Эти изменения будут точно привязаны ко времени, и их можно будет сопоставить с геологической историей Земли.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Численно решены уравнения движения тел Солнечной системы, находящихся под воздействием их взаимного тяготения, и рассмотрены движения Солнца и Земли. Результаты сопоставлены с наблюдениями и получены подтверждения движения планет за 34 года, движения Солнца за 100 лет, изменения за 900 лет угла наклона плоскости эклиптики и эксцентриситета земной орбиты.

Полученные 22-летние и 11-летние циклы в движении Солнца могут быть ответственны за циклы солнечной активности, имеющие такой же период. Эти циклы солнечной активности, по-видимому, являются причиной 11-летних климатических циклов и наблюдаемых коротко-периодических ритмов в криосфере.

Полученные устойчивые в течение 900 лет тенденции уменьшения угла наклона плоскости эклиптики, движения ее восходящего угла и уменьшения эксцентриситета земной орбиты свидетельствуют о возможном воздействии движения тел Солнечной системы на криосферные

процессы на Земле за счет изменения параметров ее орбиты.

## Литература

- Астрономический ежегодник СССР на 1949 г. М.; Л., 1947.  
 Астрономический ежегодник СССР на 1984 г. М.; Л., 1982.  
 Имбри Дж., Имбри К. П. Тайны ледниковых эпох. М., Прогресс, 1988, 264 с.  
 Кауфман У. Космические рубежи теории относительности. М., Мир, 1981, 352 с.  
 Сербуленко М. Г. Численное моделирование образования протопланет пояса Земля—Меркурий // Геология и геофизика, 1996, т. 37, № 9, с. 166—174.  
 Смутьский И. И. Теория взаимодействия. Новосибирск, Изд-во Новосиб. ун-та, НИЦ ОИГМ СО РАН, 1999, 294 с.  
 Справочное руководство по небесной механике и астродинамике / Под ред. Г. Н. Дубошина. Изд. 2-е, доп. и перераб. М., Наука, 1976, 862 с.  
 Чечельницкий А. М. Экстремальность, устойчивость, резонансность в астродинамике и космонавтике (проблемы, методы, решения). М., Машиностроение, 1980, 312 с.  
 Wood R. M., Wood K. D. Solar motion and sunspot comparison // Nature, 1965, v. 208, № 5006, p. 129—131.

*Поступила в редакцию  
21 сентября 1999 г.*