

Памяти Павла Ефимовича ЭЛЬЯСБЕРГА

**Об исследовании пространственно-  
временных вариаций плотности  
атмосферы на основе эволюции  
параметров орбит ИСЗ и разработке  
динамической модели атмосферы**

*Игорь И. ВОЛКОВ*

# Часть I.

## ИССЛЕДОВАНИЕ МНОГОЛЕТНИХ ВАРИАЦИЙ ПЛОТНОСТИ ВЕРХНЕЙ АТМОСФЕРЫ ЗЕМЛИ ПО ЭВОЛЮЦИИ ПАРАМЕТРОВ ОРБИТ ИСЗ

В начале 1969 года Павел Ефимович инициировал работы по исследованию пространственно-временных вариаций плотности верхней атмосферы и разработке динамической модели. В заинтересованные организации было направлено письмо с предложениями объединить усилия по разработке модели и для обсуждения проблем организовать семинар.

# Зависимость плотности верхней атмосферы от уровня солнечной активности

- По многолетним данным об эволюции параметров движения 15 ИСЗ на орбитах с минимальными высотами 400-1100 км исследовано изменение плотности верхней атмосферы в минимумах 4-х циклов солнечной активности.
- Установлено, что средняя плотность верхней атмосферы в минимумах солнечной активности не является постоянной и подвержена вариациям, коррелирующим с потоком радиоизлучения Солнца на волне 10,7 см и геомагнитной возмущённостью с солнечной активностью.
- Плотность атмосферы может увеличиваться или уменьшаться в минимумах солнечной активности в течение нескольких циклов.

# Атмосфера в периоды минимума солнечной активности

- Обнаружено почти линейное уменьшение плотности в минимумах солнечной активности 20, 21 и 22-го циклов для всего диапазона исследуемых высот.
- Статистическая обработка полученных результатов для 20-22 циклов солнечной активности дала следующие характеристики среднего снижения плотности:

за 10 лет	4.6% (сигма 1.94%, 25 реализаций),
за 20 лет	8.9% (сигма 4.36%, 11 реализаций).

# Долговременный анализ атмосферы в периоды минимума солнечной активности

- Достигнутое в результате длительного падения минимальное значение плотности не является необычным.
- Практически такая же минимальная плотность в минимуме солнечной активности наблюдалась в 1964-1965гг.

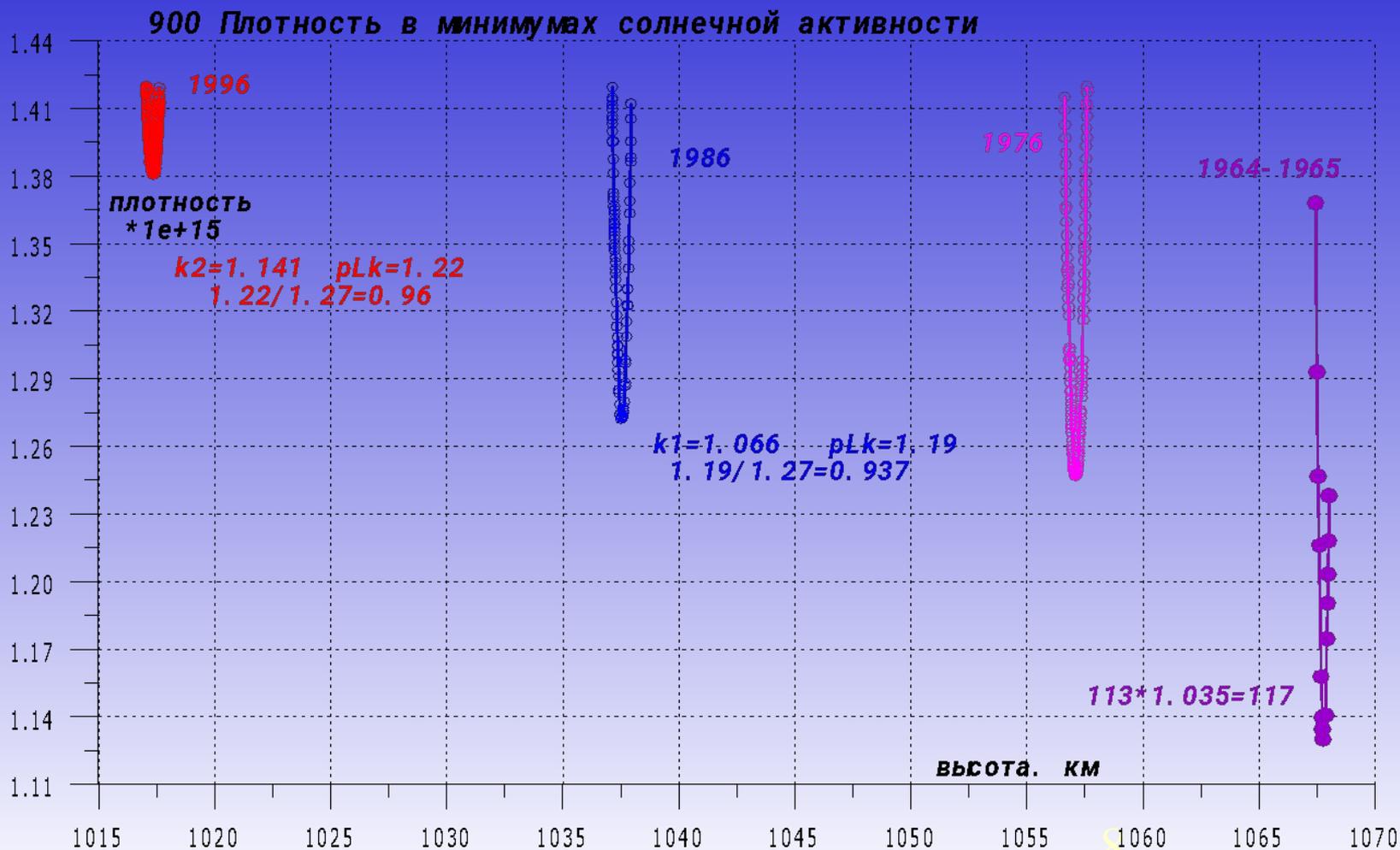
# Орбиты ИСЗ серии «КОСМОС»

Космос	hp/ha, км	$e$	Наклонение град	дата запуска
660	403/1977	0.104	82.8	июнь, 1974
807	403/1978	0.104	83.0	март, 1976
1238	411/1963	0.103	83,0	январь, 1981
1263	402/1976	0.104	83,0	апрель, 1981
1508	405/1971	0.104	82.9	ноябрь, 1983

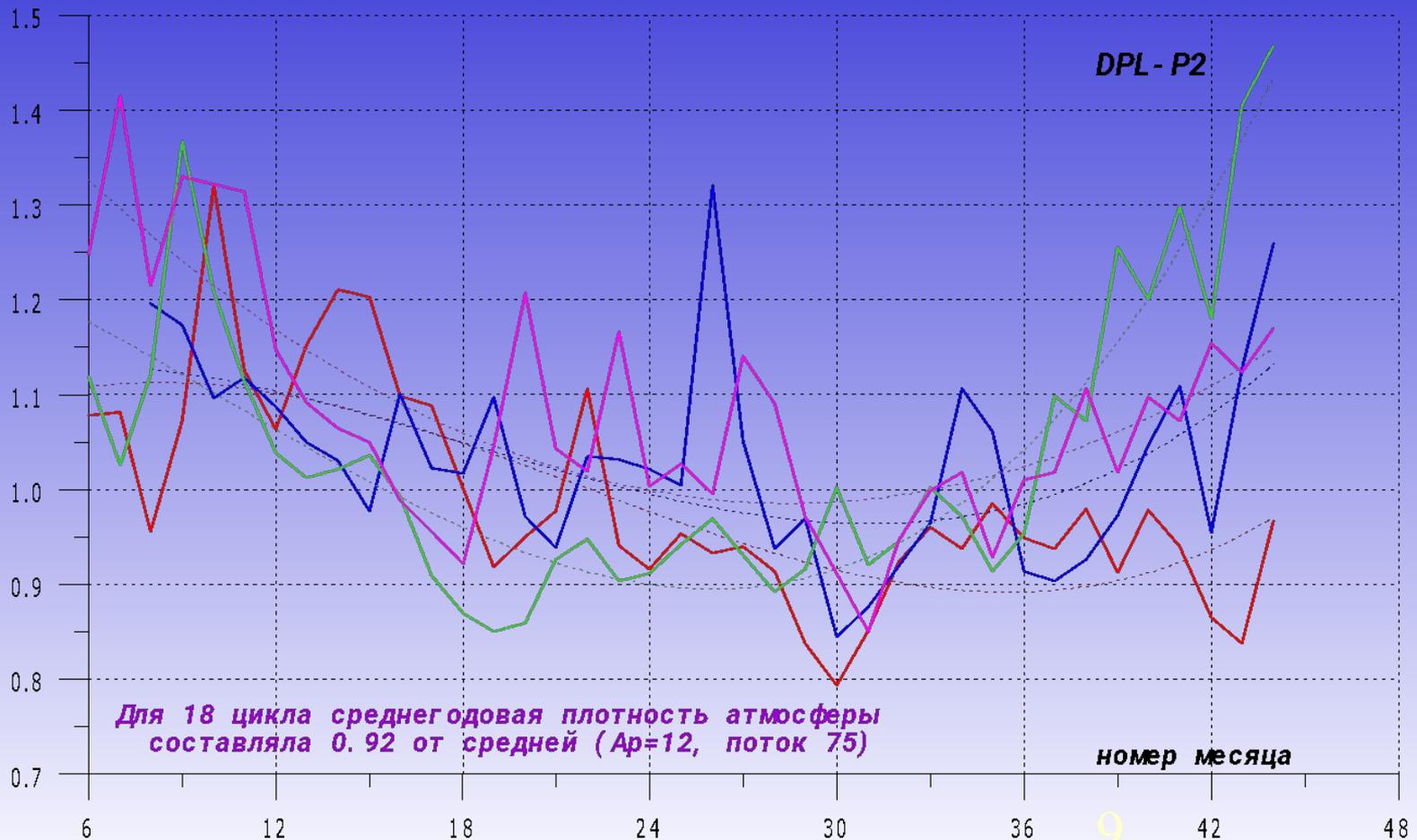
# Сферы, Норад

Год запуска, номер и имя ИСЗ	Диаметр м	Вес, кг	hм/Hmax км	e	i°	S
64-0730-SR 7A	0.60	45.0	915/940	0.0030	69.9	0.0677
64-900-Calsphere-1	0.36	0.98	1065/1090	0.0020	89.9	1.1200
64-902-Calsphere-2	0.36	9.80	1065/1095	0.0014	89.9	0.1120
65-1291-SR 7B	0.61	47.0	907/940	0.0020	70.1	0.0670
65-1361-LCS 1	1.13	34.0	2781/2796	0.0050	32.1	0.3180
65-1512-Tempsat 1	0.36	9.00	1095/1190	0.0060	90.0	0.1220
67-2872-Surcal 159	0.51	.48	925/935	0.0007	70.0	0.8880
67-2909-Surcal 150	0.41	1.55	925/935	0.0010	70.0	0.9180
69-4168-Tempsa t 2	0.41	14.5	907/937	0.0020	70.0	0.0982
71-5398-LCS 4	1.12	37.0	790/920	0.0090	87.6	0.2870

# Плотность атмосферы в районе минимальной высоты полёта ИСЗ Calsphere-1 в минимумах 20, 21 и 22-го циклов солнечной активности (1964, 1976, 1986, 1996)



# Соотношение между среднемесячной модельной плотностью атмосферы для высоты 400 км, вычисленной при средних и фактических значениях индексов в минимумах 19, 20, 21 и 22-го циклов солнечной активности



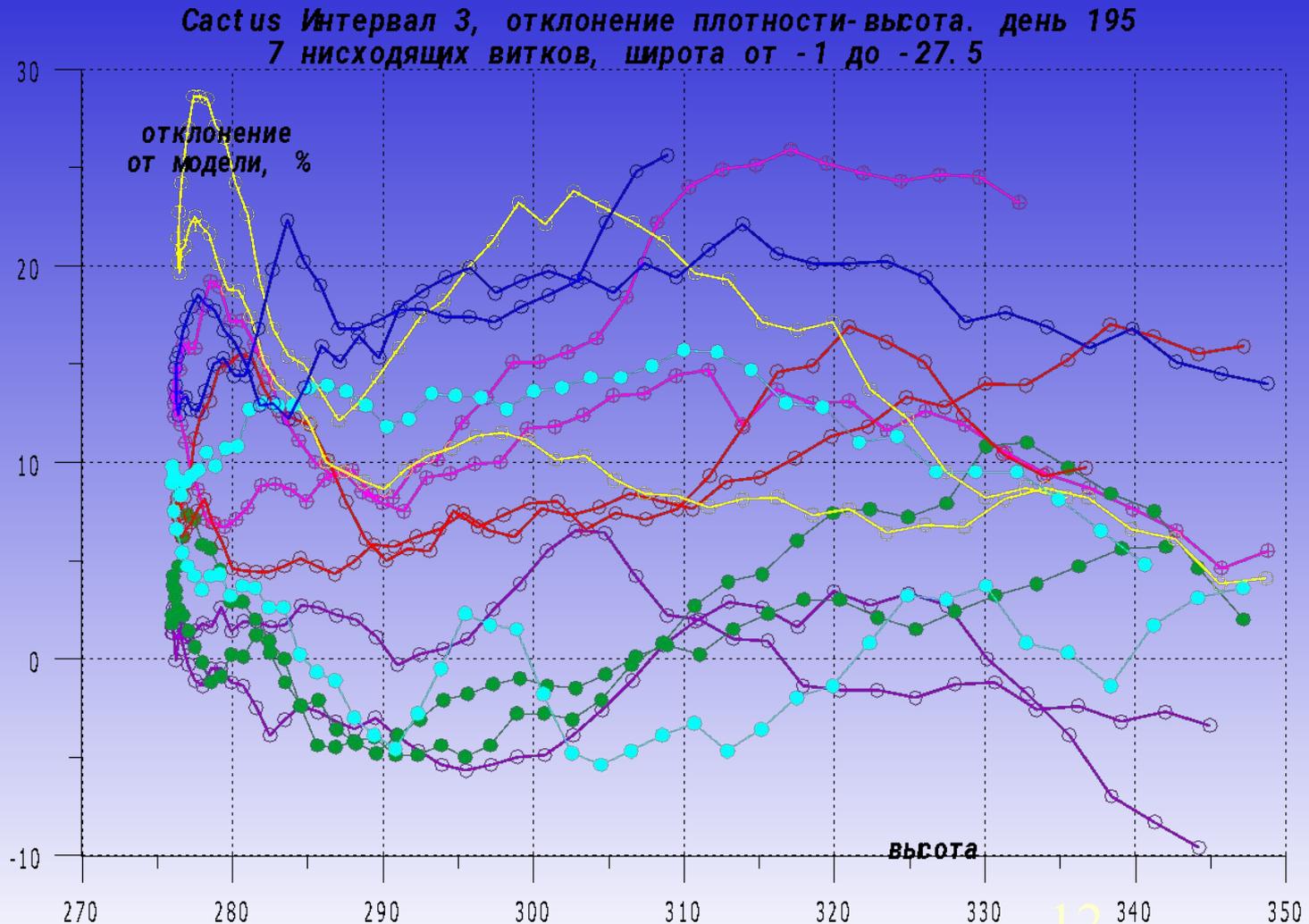
# ВЫВОДЫ

- Анализ изменения плотности за 4 цикла солнечной активности позволяет предположить, что обнаруженное продолжительное уменьшение плотности, наблюдавшееся в минимумах 20-22 циклов, не является вековым и вызвано, в основном, особенностями изменения параметров солнечной активности (потока радиоизлучения Солнца и геомагнитной возмущённости) в минимумах 19-22 циклов.

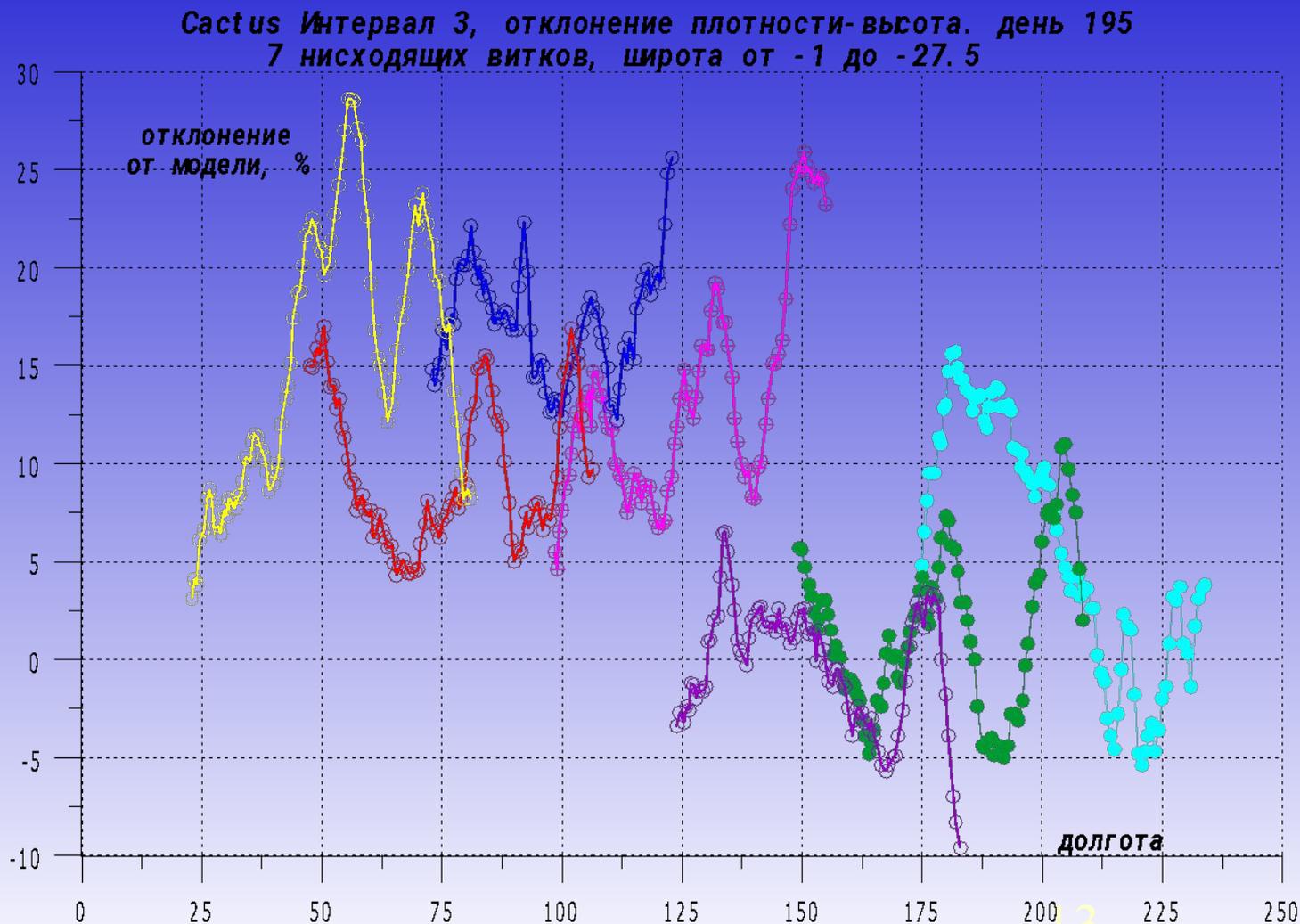
## **Часть II.**

**Исследование вариаций,  
не описываемых моделями  
атмосферы  
в проекте ОКЕАН**

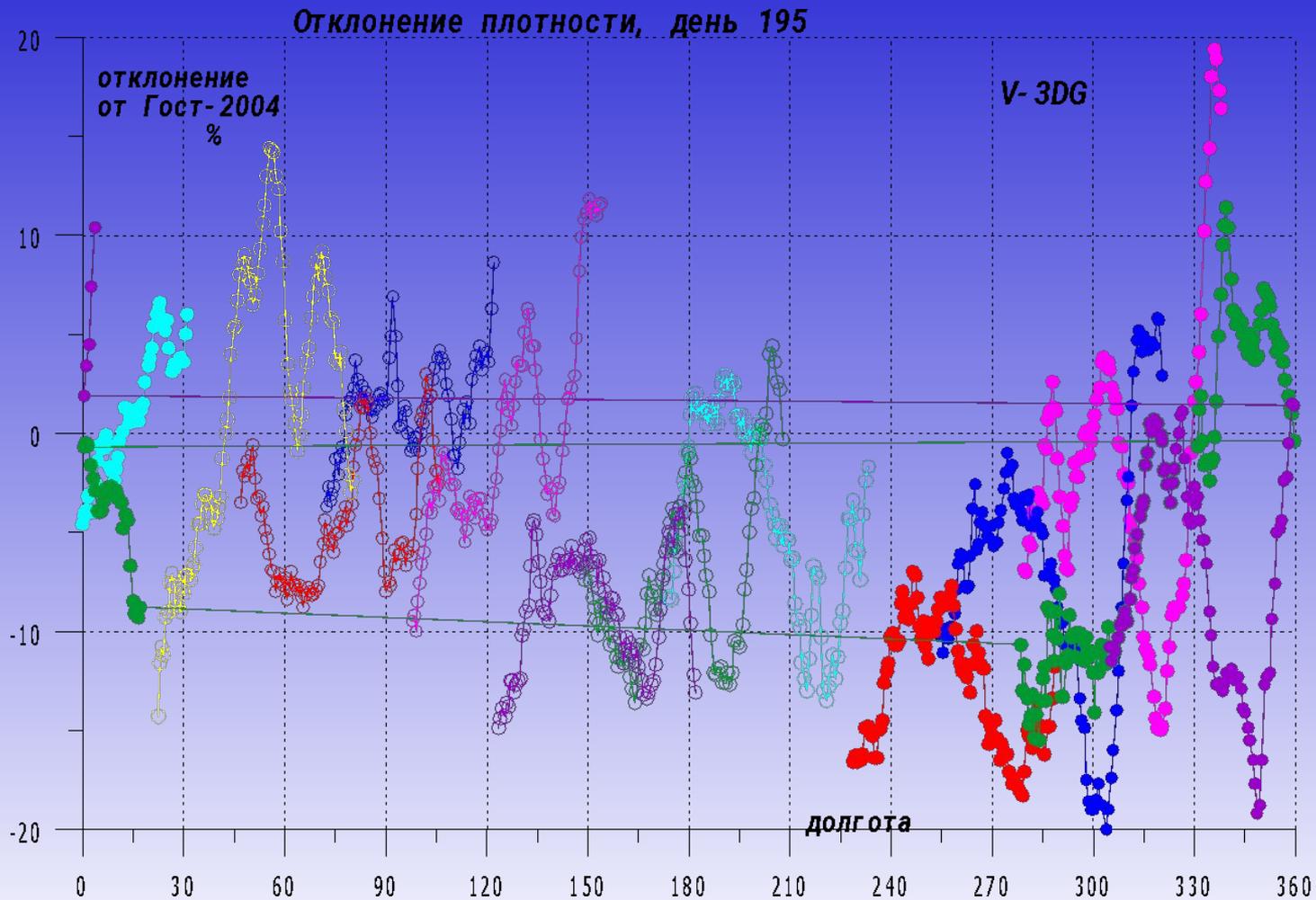
# Отклонение (%) реальной плотности от модельной в функции высоты на 7 нисходящих витках, широта от $-1^\circ$ до $-27^\circ$ , день 195



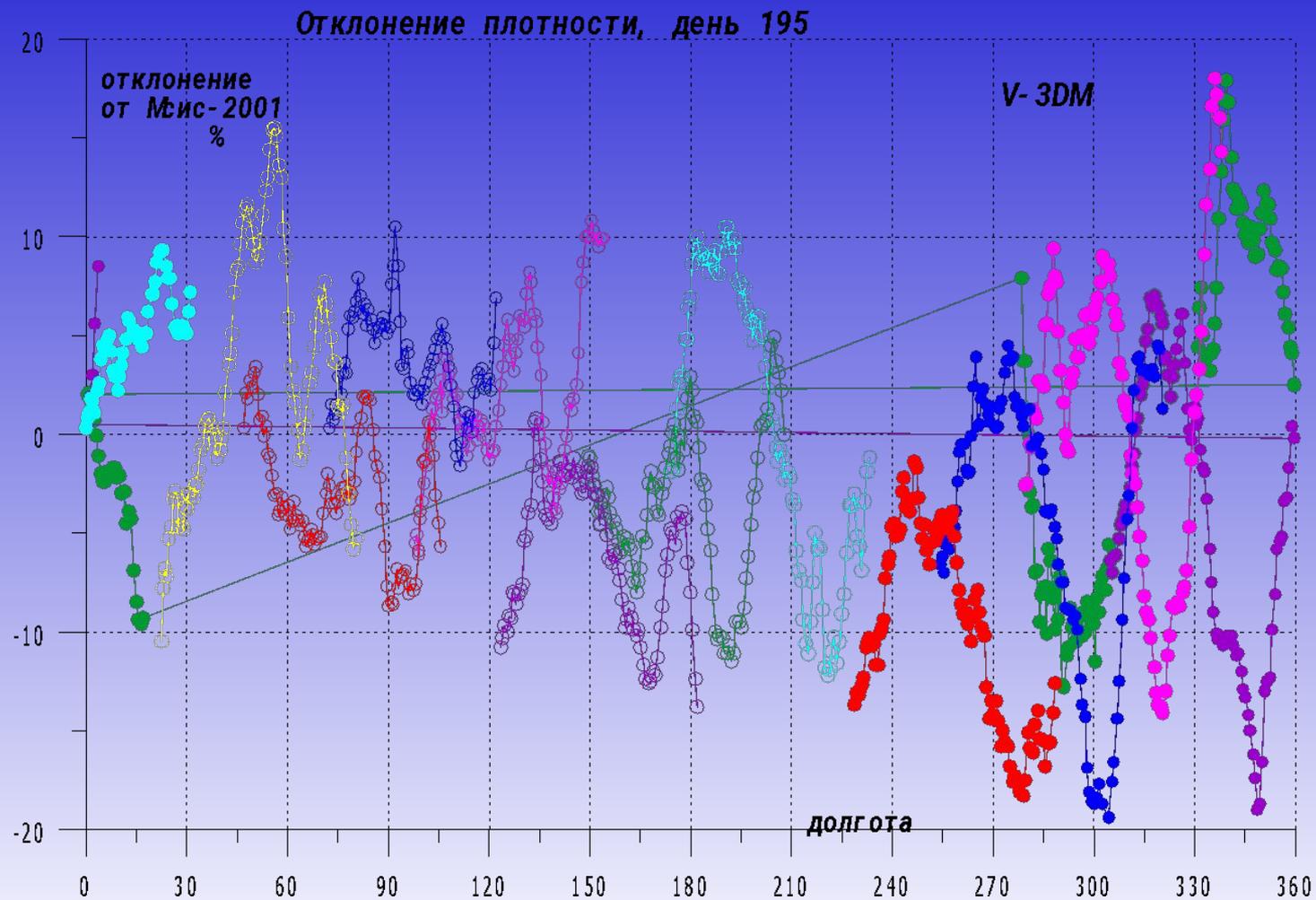
# Отклонение (%) реальной плотности от модельной в функции долготы на 7 нисходящих витках, широта от $-1^\circ$ до $-27^\circ$ , день 195



# Отклонение (%) реальной плотности от модели ГОСТ -2004 на 7 нисходящих витках, широта от $-1^\circ$ до $-27^\circ$ , день 195



# Отклонение (%) реальной плотности от модели Мсис 2001 на 7 нисходящих витках, широта от $-1^\circ$ до $-27^\circ$ , день 195



III Динамическая модель  
атмосферы  
ГОСТ-2004

*Государственный комитет Российской Федерации  
по стандартизации и метрологии*

## **НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**Атмосфера Земли верхняя  
Модель плотности для баллистического обеспечения полётов  
искусственных спутников Земли**

# **ГОСТ Р 25645.166-2004**

Дата введения 2005-01-01

**РАЗРАБОТАН**

**4-м Центральным научно-исследовательским институтом  
Министерства обороны Российской Федерации**

Авторский коллектив:

И.И. Волков, д-р техн. наук; А.В. Забокрицкий, канд. техн. наук;

В.В. Пасынков, канд. техн. наук; В.В. Суевалов, канд. техн. наук;

В.Д. Ястребов, д-р техн. наук.

# Модель плотности атмосферы $\rho$ кг/м<sup>3</sup>

$$\rho = \rho_H K_0 (1 + K_1 + K_2 + K_3 + K_4)$$

$$\rho_H = \rho_0 \exp(a_0 + a_1 h + a_2 h^2 + a_3 h^3 + a_4 h^4 + a_5 h^5 + a_6 h^6),$$

$$K_0 = 1 + (l_0 + l_1 h + l_2 h^2 + l_3 h^3 + l_4 h^4)(F_{81} - F_0)/F_0;$$

$$K_1 = (c_0 + c_1 h + c_2 h^2 + c_3 h^3 + c_4 h^4) \cos^{n_0 + n_1 h + n_2 h^2} \varphi / 2;$$

$$\cos \varphi = \frac{1}{r} (z \sin \delta_{\otimes} + \cos \delta_{\otimes} (x \cos \beta + y \sin \beta));$$

$$\beta = \alpha_{\otimes} - \mathbf{s}^* - \omega_3 \mathbf{t} + \varphi_1;$$

$$K_2 = (d_0 + d_1 h + d_2 h^2 + d_3 h^3 + d_4 h^4) A(d);$$

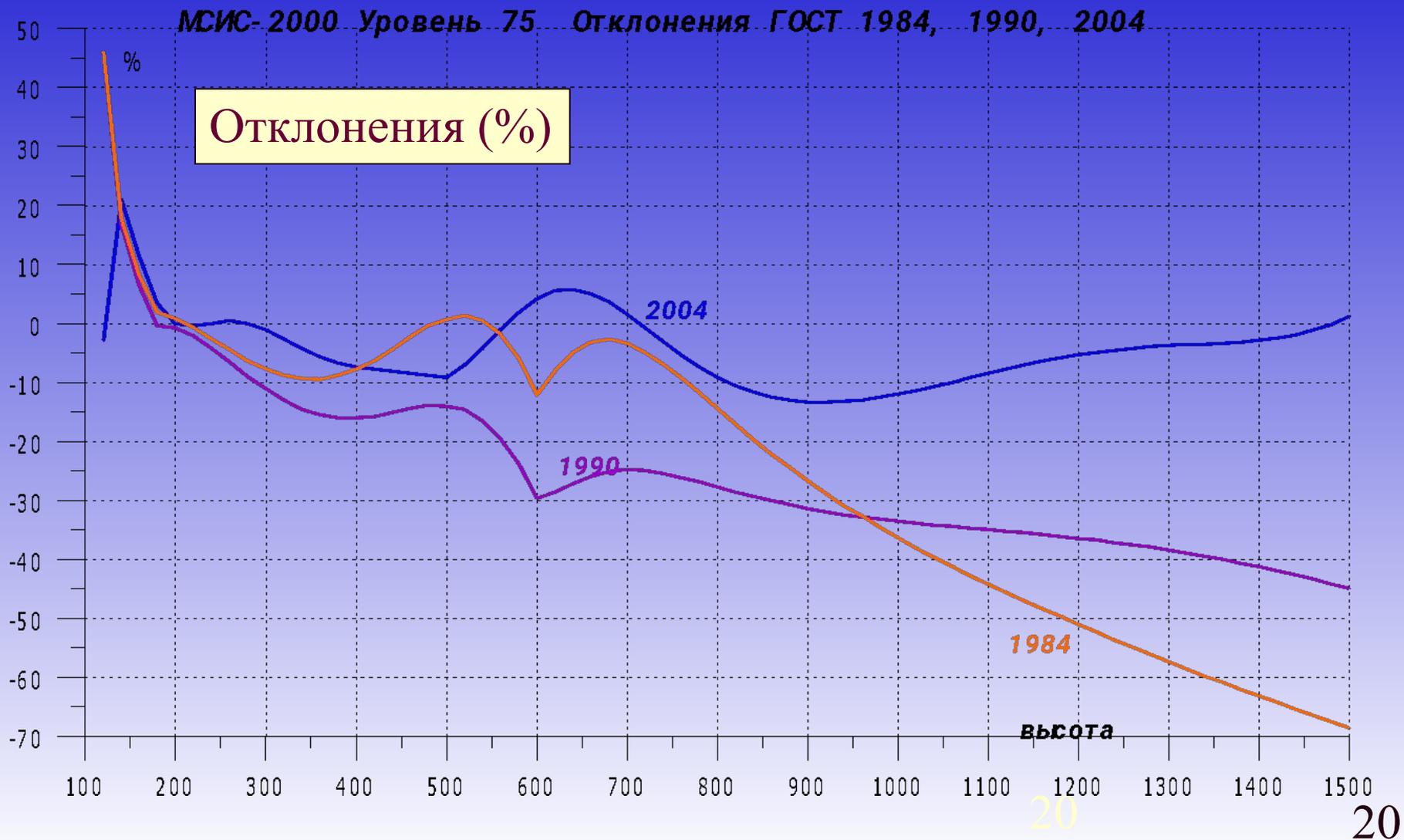
$$K_3 = (b_0 + b_1 h + b_2 h^2 + b_3 h^3 + b_4 h^4)(F_{10,7} - F_{81}) / (F_{81} + |F_{10,7} - F_{81}|);$$

$$K_4 = (e_0 + e_1 h + e_2 h^2 + e_3 h^3 + e_4 h^4)(e_5 + e_6 K_p + e_7 K_p^2 + e_8 K_p^3);$$

# Параметры модели

- $K_0, K_1, K_2, K_3, K_4$  - множители, учитывающие:
- $K_0$  - изменение плотности атмосферы, связанное с отклонением среднего взвешенного индекса  $F_{81}$  от фиксированного  $F_0$ ;
- $K_1$  - суточный эффект в распределении плотности;
- $K_2$  - полугодовой эффект;
- $K_3$  - изменение плотности, связанное с отклонением  $F_{10.7}$  от  $F_{81}$ ;
- $K_4$  - зависимость плотности атмосферы от геомагнитной возмущённости;
- $\beta$  - разность между долготой, для которой рассчитывается плотность атмосферы, и долготой с максимальным значением плотности в её суточном распределении, рад;
- $\phi$  - центральный угол между точкой пространства, для которой рассчитывается плотность, и точкой пространства с максимальным значением плотности в её суточном распределении, рад;
- $\phi_1$  - коэффициент модели, равный углу запаздывания максимума плотности по отношению к максимуму освещённости, рад;
- $A(d)$  - множитель, характеризующий влияние полугодового эффекта на плотность атмосферы;
- $d$  – число суток от начала года;
- $a_i, b_i, c_i, d_i, e_i, l_i, n_i, \phi_1$  - коэффициенты модели, используемые для расчёта плотности атмосферы при различных значениях фиксированного уровня солнечной активности  $F_0$ ;

# Сравнение плотности ночной атмосферы ГОСТ 1984, 1990, 2004 и МСИС-2000 (уровень 75)



# Сравнение плотности ночной атмосферы ГОСТ 1984, 1990, 2004 и МСИС-2000 (уровень 250)

