Вестник
МОСКОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
№ 5 — 1965

УДК 551.510 : 629.195.2

Н. Н. КОЗЛОВ

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛОТНОСТИ АТМОСФЕРЫ ПО НАБЛЮДАЕМОМУ ТОРМОЖЕНИЮ ТРЕТЬЕГО СОВЕТСКОГО ИСКУССТВЕННОГО СПУТНИКА ЗЕМЛИ

Приводится способ определения плотности атмосферы по наблюдениям искусственных спутников. Приводятся значения плотности атмосферы на высотах перигея третьего советского ИСЗ. Отклонения полученных значений плотности от значений, даваемых барометрическим законом, приближенно интерпретируются изменением солнечной активности и перемещением перигея спутника с освещенной стороны Земли на теневую.

Располагая наблюдениями орбиты искусственного спутника Земли (ИСЗ), можно получать некоторые физические параметры, относящиеся к Земле: сжатие, коэффициенты в разложении потенциала Земли и т. д.

Для спутников, которые имеют перигей ~ 200 *км*, существенным фактором в движении является действие атмосферы Земли. Это возмущение, в частности, уменьшает большую полуось орбиты ИСЗ, а следовательно спутник приближается к Земле и в конце концов сгорает в плотных слоях атмосферы. Таким образом, элементы орбит близких ИСЗ, полученные из наблюдений, содержат возмущения от действия атмосферы Земли и служат материалом для вычисления плотности атмосферы.

При анализе эволюции орбиты ИСЗ вследствие торможения в земной атмосфере можно получить расчетную формулу [2, 3, 4], которую запишем приближенно в виде

$$\rho_\pi = -\frac{2}{3k}\,\frac{\sqrt{e}\,\dfrac{1-e}{1+e}\,\dfrac{d\ln T}{dN}}{\sqrt{2\pi p H}}, \tag{1}$$

где ρ_π — плотность воздуха в перигее, e — эксцентриситет орбиты спутника, $p=a\,(1-e^2)$ — параметр орбиты (a — большая полуось), N — порядковый номер оборота спутника, $T=\dfrac{2\pi}{\sqrt{fM}}\,a^{3/2}$ — период обращения спутника вокруг Земли, H — высота однородной атмосферы, k — баллистический коэффициент; $k=\dfrac{\alpha\sigma}{m}$, α — коэффициент аэродинамического сопротивления, σ — эффективная площадь сечения спутника, m — масса спутника.

Отброшенные члены в данном выражении имеют порядок e^3 и $\dfrac{H}{8ae}$.

Из [1] были взяты следующие данные наблюдений: t_0UT — момент наблюдения, i — угол наклона орбиты спутника к земному экватору, φ — угол эксцентриситета ($e=\sin\varphi$), $\bar{n}$ — среднее движение.

Однако среднее движение, даваемое [1], содержало поправку за вековое возмущение средней аномалии M_0'. Эта поправка возникает из-за сжатия Земли [5] и имеет окончательный вид

$$M_0' = \frac{1}{2} I \left(\frac{a'}{a}\right)^2 \frac{3\cos^2 i - 1}{(1-e^2)^{3/2}} n, \tag{2}$$

где a' — экваториальный радиус Земли, I — малая, безразмерная величина порядка сжатия Земли, n — истинное среднее движение, связанное с a по третьему закону Кеплера: $n^2a^3=fM$.

При обработке наблюдений принимались следующие значения постоянных: $fM=398\,590$ *км*^{3}*сек*$^{-2}$, $I=0{,}001625$, $a'=6378{,}15$ *км*, $\alpha=0{,}002$ (CGS), $P=1327$ *кг* — вес, $h=357$ *см* — высота, $l=173$ *см* — диаметр основания спутника.

Высота однородной атмосферы точно неизвестна. Приближенно, на основании [6], можно взять: для $h_\pi=180\pm10$ *км*, $H=42$ *км*, для $h_\pi=200\pm10$ *км* $H=43$ *км*, для $h_\pi=220\pm10$ *км*, $H=44$ *км*.

На основании теории ошибок [7] точность вычисления ρ_π по формуле (1) равна $\pm0{,}1\cdot10^{-13}$ *г/см*^{3}. Вычисления проводились параллельно при $k=0{,}03474$ (CGS) (в этом случае σ равно основанию конуса) и при $k=0{,}04565$ (CGS) (в этом случае σ есть наибольшее сечение спутника, равное осевому сечению конуса). Из-за такого увеличения k плотность уменьшалась на величину 1,4—0,8 10^{-13} *г/см*^{3}.

В табл. 1 приводятся ряд значений плотности на высотах перигея при $k=0{,}03474$ (CGS).

Таблица 1

t_0 UT	h_π, *км*	ρ_π, *г/см*^{3}	ρ_T, *г/см*^{3}
1958 ноябрь, 21,0	204,6	$5{,}5\cdot10^{-13}$	$4{,}2\cdot10^{-13}$
декабрь, 7,0	205,0	5,9	4,2
25,0	205,5	5,1	4,1
1959 январь, 9,0	206,4	4,3	4,0
февраль, 7,0	208,8	4,9	3,8
март, 22,0	210,8	4,8	3,7
апрель, 28,0	212,2	4,2	3,6
июнь, 4,0	213,8	3,8	3,4
август, 2,0	209,6	3,4	3,8
сентябрь, 8,0	204,0	4,3	4,3
октябрь, 10,0	198,2	5,1	5,0
ноябрь, 18,0	190,2	5,7	5,9
декабрь, 15,0	186,0	6,3	6,6
1960 февраль, 11,0	181,8	6,6	7,3

Для сравнения приводятся значения ρ_T, вычисленные по обычной барометрической формуле:

$$\rho_T = \rho_0 e^{-\frac{h_\pi - h_0}{H}}, \tag{3}$$

где $\rho_0=4{,}3\ 10^{-13}$ *г/см*^{3}, $h_0=204{,}0$ *км*.

Значение ρ_0, взятое из наших вычислений, есть плотность атмосферы на высоте h_0 на ночной стороне и оно соответствует среднему уровню активности Солнца в течение периода наблюдений спутника.

По результатам табл. 1 был построен график (рис. 1), наглядно показывающий изменение плотности с высотой. Пунктиром обозначен получившийся ход плотности, а сплошной кривой — теоретическое изменение ее, даваемое формулой (3). Пунктирную кривую можно приближенно интерпретировать изменением солнечной активности во время полета третьего спутника и перемещением его перигея с дневной стороны Земли на ночную (фактор день — ночь). Влияние этих возмущений нетрудно заметить при рассмотрении ряда значений плотности на почти одинаковых высотах. Это иллюстрирует табл. 2.

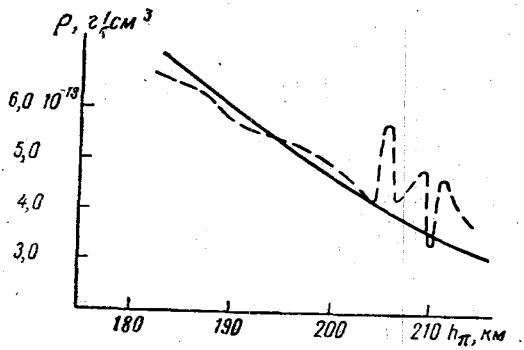

Рис. 1. Ход плотностей ρ_π и ρ_T с изменением высоты перигея

Как видно из табл. 2, увеличение числа R, зависящего от количества солнечных пятен, приблизительно вдвое приводит к увеличению плотности на величину $\Delta\rho_1 = 0{,}6 \cdot 10^{-13}$ *г/см*³. В этом случае для обоих моментов перигей спутника был на дневной стороне. Если же значения R примерно одинаковы, то благодаря перемещению перигея (фактор

Таблица 2

$t_0 UT$	R	место перигея	ρ_π, *г/см*³	h_π, *км*
1958 ноябрь, 29,0	259	день	$6{,}1 \cdot 10^{-13}$	204,6
21,0	125	день	5,5	204,6
1959 сентябрь, 8,0	136	ночь	4,3	204,0

день — ночь) плотность воздуха изменялась на $\Delta\rho_2 = 1{,}2 \cdot 10^{-13}$ *г/см*³. Следует учесть, что обе эти поправки не являются постоянными величинами. В частности, на непостоянство второй из них указывает изменение плотности в течение суток — от утра к полудню, далее к вечеру и, наконец, к полуночи. Это обстоятельство приводит к тому, что $\Delta\rho_2$ может как увеличиваться, так и уменьшаться, достигая максимального значения, равного $\sim 2 \cdot 10^{-13}$ *г/см*³ для высоты 200 *км*.

Таблица 3

t_0 UT	h_π, *км*	ρ_π, *г/см*³	R	Место перигея
1958 декабрь, 7,0	205,0	$5{,}9 \cdot 10^{-13}$	242	день
15,0	205,0	5,3	150	день
1959 январь, 1,0	206,0	4,5	221	ночь
9,0	206,4	4,3	245	ночь
1958 ноябрь, 10,0	205,2	5,7	85	день
декабрь, 25,0	205,5	5,1	218	ночь

Более сложную картину изменения вычисленных значений плотности от указанных факторов дает табл. 3. Для первой пары значений при одной и той же высоте 205 *км* $\Delta\rho = 0{,}6 \cdot 10^{-13}$ *г/см*³. Изменение плотности у второй пары значений невелико, ибо физические условия у обеих то-

чек почти одинаковы. Из первых двух пар ясно видно, что плотность воздуха днем выше, чем ночью на $1{,}5 \cdot 10^{-13}$ *г/см*$^{-3}$ для высоты 205—206 *км*. Для третьей пары значений плотности $\Delta\rho = 0{,}6 \cdot 10^{-13}$ *г/см*, $\Delta\rho = \Delta\rho_2 - \Delta\rho_1$. Если значения $\Delta\rho_2$ и $\Delta\rho_1$ совпадают с приведенными выше, то последние точки объясняются вполне удовлетворительно.

Заметим, что для более строгого анализа необходимо иметь более точные наблюдения и знать время суток, когда спутник находился в перигее. Это позволит также учитывать другие, менее значительные возмущения.

В заключение приношу благодарность докт. физ. мат. наук Ю. А. Рябову за постоянную помощь в работе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бюллетень станций оптического наблюдения искусственных спутников Земли, № 7. М., Изд-во АН СССР, 1960.
2. Лидов М. Л. «Искусственные спутники Земли», вып. 1. М., Изд-во АН СССР, 1958, 9—20.
3. Охоцимский Д. Е., Энеев Т. М., Таратынова Г. П. «Успехи физических наук», **63**, вып. 1 а, 33—50, 1957.
4. Яцунский И. М. «Астронавтика и ракетодинамика», № 48, 59—72, 1961.
5. Проскурин В. Ф., Батраков Ю. В. «Искусственные спутники Земли», вып. 3. М., Изд-во АН СССР, 1959, 39—46.
6. Рябов Ю. А. Движение небесных тел. М., Физматгиз, 1962.
7. Щиголев Б. М. Математическая обработка наблюдений. М., Физматгиз, 1960.

Поступила в редакцию
13. 11 1963 г.

Кафедра
небесной механики и
гравиметрии