УДК 629.78 https://doi.org/10.15407/itm2019.03.054

А. И. МАСЛОВА

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНЫХ ЗНАЧЕНИЙ ПЛОТНОСТИ АТМОСФЕРЫ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЙ ОРБИТАЛЬНОГО ПОЛЕТА

Институт технической механики
Национальной академии наук Украины и Государственного космического агентства Украины,
ул. Лешко-Попеля, 15, 49005, Днепр, Украина; e-mail: I_anjyta@bigmir.net

Підвищення якості систем дистанційного зондування Землі багато в чому пов'язано з розвитком алгоритмів управління рухом космічних апаратів (КА). Серед нових завдань управління ставиться задача підтримки заданих параметрів орбіти на тривалому інтервалі часу. Для цього пропонується постійно (безперервно або дискретно) компенсувати збурюючі впливи на КА. Можливості сучасних електрореактивних двигунів дозволяють компенсувати значний аеродинамічний вплив на КА. Це, в свою чергу, відкриває можливість зниження діапазону робочих орбіт, що використовують КА дистанційного зондування Землі (ДЗЗ), до нетрадиційно низьких (дуже низьких або наднизьких) орбіт висотою близько 300 км. Використання таких наднизьких орбіт для КА ДЗЗ має ряд переваг.

На низьких навколоземних орбітах один з основних збурюючих впливів чинить опір атмосфери Землі. Оцінка цього впливу необхідна на етапі попереднього проектування систем енергозабезпечення КА при розробці вимог до двигунів, що мають компенсувати збурюючі впливи. Метою даної статті є побудува оцінки можливих значень густини атмосфери, що дозволяють швидко провести передпроектні розрахунки аеродинамічного впливу на КА для заданих умов орбітального польоту. Оцінки побудовані на основі стандарту ГОСТ Р 25645.166 – 2004 «Атмосфера Земли верхняя. Модель плотности для баллистического обеспечения полетов искусственных спутников Земли» з врахуванням їхньої залежності від висоти і фіксованого рівня сонячної активності. Розглянуто вплив на густину атмосфери таких факторів, як добовий ефект розподілу густини, піврічний ефект, вплив зміни сонячної і геомагнітної активності. Проведено оцінки коефіцієнтів, що описують вплив цих факторів, на висотах (300–700) км і визначено умови, при яких вони приймають екстремальні (максимальні/мінімальні) значення. Визначено умови, при яких будуть спостерігатися екстремальні значення густини. В якості прикладу показано, що на висоті 300 км теоретично густина може змінюватися більш, ніж на 2 порядки (від 1,07е-12 кг/м^3 до 1,22е-10 кг/м^3). Використання результатів, представлених в статті, дозволяє швидко оцінити діапазон можливих значень аеродинамічного впливу на КА.

Ключові слова: *статистичний критерій, еліпсоїд розсіювання, метод головних компонентів, твердопаливний двигун, коваріаційна матриця.*

Повышение качества систем дистанционного зондирования Земли во многом связано с развитием алгоритмов управления движением космических аппаратов (КА). Среди новых задач управления ставится задача поддержания заданных параметров орбиты на длительном интервале времени. Для этого предлагается постоянно (непрерывно или дискретно) компенсировать возмущающие воздействия на КА. Возможности современных электрореактивных двигателей позволяют компенсировать значительные аэродинамические воздействия на КА. Это, в свою очередь, открывает возможность снижения диапазона рабочих орбит, используемых КА дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), до нетрадиционно низких (очень низких или сверхнизких) орбит высотой порядка 300 км. Использование таких сверхнизких орбит для КА ДЗЗ имеет ряд преимуществ.

На низких околоземных орбитах одно из основных возмущающих воздействий оказывает сопротивление атмосферы Земли. Оценка этого воздействия необходима на этапе предварительного проектирования систем энергообеспечения КА при разработке требований к двигательным установкам, компенсирующим возмущающее воздействие. Целью данной статьи является построение оценок возможных значений плотности, позволяющих быстро провести предпроектные расчеты аэродинамического воздействия на КА для заданных условий орбитального полета. Оценки построены на основании стандарта ГОСТ Р 25645.166 – 2004 «Атмосфера Земли верхняя. Модель плотности для баллистического обеспечения полетов искусственных спутников Земли» с учетом их зависимости от высоты и фиксированного уровня солнечной активности. Рассмотрено влияние на плотность атмосферы таких факторов, как суточный эффект распределения плотности, полугодовой эффект, влияние изменения солнечной и геомагнитной активности. Проведены оценки коэффициентов, описывающих влияние этих факторов, на высотах (300–700) км и определены условия, при которых они принимают экстремальные (максимальные/минимальные) значения. Определены условия, при которых будут наблюдаться экстремальные значения плотности. В качестве примера показано, что на высоте 300 км теоретически плотность может меняться более чем на 2 порядка (от 1,07е-12 кг/м^3 до 1,22е-10 кг/м^3). Использование результатов, представленных в статье, позволяет быстро оценить диапазон возможных значений аэродинамического воздействия на КА.

Ключевые слова: *статистический критерий, эллипсоид рассеяния, метод главных компонент, твердотопливный двигатель, ковариационная матрица.*

Improving the quality of Earth remote sensing systems is largely due to the development of spacecraft motion control algorithms. A new control problem is to maintain given orbit parameters over a long period of time. To do this, it is proposed to constantly (continuously or discretely) counteract disturbing actions on the spacecraft. The capabilities of modern electrojet engines make it possible to counteract significant aerodynamic actions. This, in its turn, opens up possibilities of reducing the range of working orbits for remote sensing spacecraft to unconventionally low (very low or superlow) orbits of altitude about 300 km. Such superlow orbits for remote sensing spacecraft‘ have a number of advantages.

In low Earth orbits, one of the main disturbing actions is aerodynamic drag. Its estimation is necessary at the preliminary design stage of spacecraft power supply systems when developing requirements for disturbancecounteracting engines. The purpose of this paper is to estimate the possible atmospheric density, which would allow one to quickly conduct pre-design calculations of the aerodynamic drag on the spacecraft for given orbital flight conditions. The density was estimated using the Standard GOST R 25645.166 – 2004, "The Earth's Upper Atmosphere. Density Model for Ballistic Support of Satellite Flights," depending on the altitude and a fixed level of solar activity. In doing so, the effect of the following factors on the atmospheric density was considered: the daily effect, the semi-annual effect, and the effect of solar and geomagnetic activity. The coefficients that describe the effect of these factors were estimated at altitudes of 300 to 700 km, and the conditions under which these coefficients and the atmospheric density take extreme (maximum/minimum) were determined. As an example, it was shown that at an altitude of 300 km, the density can theoretically vary by more than two orders of magnitude (from 1.07e-12 kg/m^3 to 1.22e-10 kg/m^3). The results presented in this paper allow one to quickly estimate the possible range of the aerodynamic drag on the spacecraft.

Keywords: *statistical criterion, dispersion, principal components method, solid-propellant engine, covariation matrix.*

Введение. Вопросы разработки и усовершенствования технологий для повышения качества спутниковых систем дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) остаются актуальными уже на протяжении многих лет. Для космических аппаратов (КА) ДЗЗ удобно использовать низкие солнечно-синхронные орбиты. На таких орбитах аэродинамическое воздействие может существенно влиять на движение КА. В настоящее время в литературе широко рассматриваются вопросы, связанные с разработкой алгоритмов управления, необходимых для поддержания заданных параметров орбиты (см., например, [1 – 6]).

Возможности современных электрореактивных двигателей, технология использования которых к настоящему времени прочно устоялась, позволяют компенсировать аэродинамическое воздействие даже для очень низких орбит. Однако для выбора оптимальных параметров двигателя (оптимального соотношения между массой, размерами и его энергетическими характеристиками) необходимо определить: компенсацию какого (по величине) аэродинамического воздействия он должен обеспечивать? При определении силы аэродинамического воздействия на КА плотность атмосферы является наиболее нестабильной величиной (коэффициент аэродинамического воздействия и площадь миделя КА в большинстве случаев можно считать постоянным). В данной статье представлена методика построения оценок возможных значений плотности атмосферы для различных условий полета.

Постановка задачи. Необходимо определить диапазон возможных значений плотности атмосферы для заданной высоты орбиты и различных условий орбитального полета, а также условия, при которых достигаются экстремальные (минимальное и максимальное) значения плотности.

Оценки строятся на основании модели плотности атмосферы ГОСТ Р 25645.166-2004 [7], которая позволяет рассчитывать плотность для различных уровней солнечной активности, при заданных дате, времени и координатах точки пространства. Согласно [7] плотность атмосферы находится следующим образом

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

где ρ_H – плотность ночной атмосферы; K_0 – изменения плотности атмосферы, обусловленные различиями между F_{81} (средневзвешенный индекс солнечной активности – результат осреднения среднесуточных значений индекса солнечной активности $F_{10.7}$ за три оборота солнца (81 сутки)) и F_0 (фиксированные значения уровня солнечной активности, для которых в табличном виде заданы коэффициенты в [7]); K_1 – коэффициент, описывающий суточный эффект распределения плотности; K_2 – коэффициент, описывающий полугодовой эффект распределения плотности; K_3 – коэффициент, описывающий изменения плотности, обусловленные разницей между $F_{10.7}$ и F_{81}; K_4 – коэффициент, который описывает изменения плотности из-за геомагнитной активности. Индексы солнечной активности будем измерять в так называемых солнечных единицах потока (с.е.п.), 1 с.е.п. = 10^{-22} Вт/(м$^2 \cdot$ Гц) [8].

Определение изменений плотности атмосферы, связанных с отклонением средневзвешенного от фиксированного индекса солнечной активности (изменение коэффициента K_0). Табличные данные [7] представлены для семи фиксированных уровней солнечной активности (F_0 изменяется от 75 с.е.п. до 250 с.е.п. с шагом 25 с.е.п.). При расчете плотности атмосферы используют значения коэффициентов модели для уровня F_0, ближайшего к значению F_{81}. Коэффициент K_0, описывающий изменение плотности атмосферы, связанное с отклонением F_{81} от F_0, определяется следующим образом

$$K_0 = 1 + \frac{F_{81} - F_0}{F_0} \sum_{i=0}^{4} l_i h^i ,$$

где l_i ($i = 0,1,...,4$) – постоянные коэффициенты, заданные таблично для семи фиксированных уровней солнечной активности; h – высота точки над поверхностью общего земного эллипсоида.

Понятно, что при совпадении значений средневзвешенного индекса солнечной активности (F_{81}) и фиксированного уровня солнечной активности (F_0) коэффициент K_0 равен единице. Экстремальные (максимальные/минимальные) значения этого коэффициента будут наблюдаться при наибольшем удалении индекса F_{81} от значений F_0, представленных в [7], т. е. при $|F_{81} - F_0| = 12{,}5$ с.е.п. (25 с.е.п. – шаг задания в [7] фиксированных уровней солнечной активности). Коэффициент K_0 будет меняться линейно с изменением разности между F_{81} и F_0, т. е. $K_0 = 1 + K_0^*(F_{81} - F_0)$, где $K_0^* = \frac{1}{F_0} \sum_{i=0}^{4} l_i h^i$.

Изменение коэффициента K_0^* в зависимости от высоты для трех фиксированных уровней солнечной активности представлено на рисунке 1 (здесь и далее на рисунках обозначено: 1 – расчеты при F_0 =75 с.е.п., 2 – расчеты при F_0 =150 с.е.п., 3 – расчеты при F_0 =250 с.е.п.).

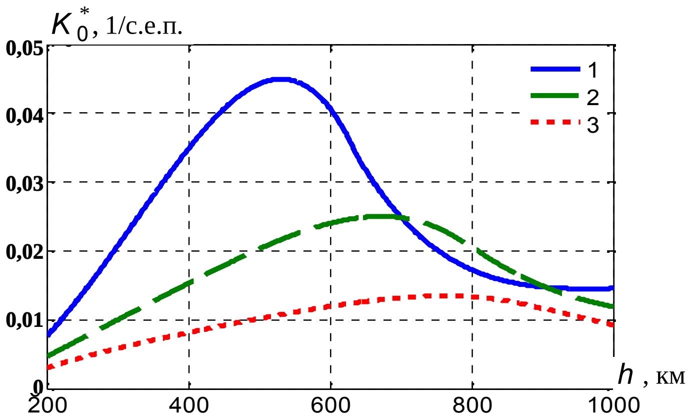

Рис. 1

Из рисунка видно, что максимальное влияние отклонения индекса F_{81} от F_0 возможно при низкой солнечной активности на высоте $h_{экстр}$ порядка 532 км, $\max\left(K_0^*\right) = 0{,}045$ 1/с.е.п. С увеличением солнечной активности растет высота, на которой возможно максимальное влияние коэффициента K_0 на плотность атмосферы (для $F_0 = 150$ с.е.п.: $h_{экстр} \approx 672$ км и $\max\left(K_0^*\right) = 0{,}025$ 1/с.е.п; для $F_0 = 250$ с.е.п.: $h_{экстр} \approx 763$ км и $\max\left(K_0^*\right) = 0{,}0134$ 1/с.е.п). Экстремальные значения коэффициента K_0 представлены в таблице 1.

Табл. 1

	F_0 = 75 с.е.п.		F_0 = 150 с.е.п.		F_0 = 250 с.е.п.	
	$\min(K_0)$	$\max(K_0)$	$\min(K_0)$	$\max(K_0)$	$\min(K_0)$	$\max(K_0)$
h = 300 км	0,741	1,259	0,875	1,125	0,927	1,073
h = 400 км	0,565	1,435	0,809	1,191	0,898	1,102
h = 500 км	0,447	1,553	0,747	1,253	0,873	1,127
h = 600 км	0,492	1,508	0,700	1,300	0,851	1,149
h = 700 км	0,689	1,311	0,690	1,310	0,835	1,165

Суточный эффект в распределении плотности. Коэффициент K_1, описывающий суточный эффект распределения плотности атмосферы, зависит от высоты и положения рассматриваемой точки относительно точки пространства с максимальным значением плотности. Коэффициент K_1 определяется следующим образом

$$K_1 = \sum_{i=0}^{4} c_i h^i \cdot \cos^{n_0 + n_1 h + n_2 h^2} \varphi/2, \quad \max(K_1) = K_1^* = \sum_{i=0}^{4} c_i h^i,$$

где c_i ($i = 0, 1, \ldots, 4$), n_i ($i = 0, 1, 2$) – коэффициенты модели [7]; φ – центральный угол между точкой пространства, для которой рассчитывают плотность, и точкой пространства с максимальным значением плотности в ее суточном распределении.

Из выражения для K_1 видно, что изоповерхности плотности атмосферы в ее суточном распределении представляют собой поверхности тела вращения с осью симметрии, проходящей через центр Земли и точку максимального значения плотности в ее суточном распределении. Назовем эту ось осью симметрии атмосферного горба. Влияние суточного эффекта на распределение плотности рассмотрено в [9].

Для каждого F_0 существует своя определенная высота максимальных суточных изменений плотности атмосферы. На рисунке 2 представлено изменение K_1^* от высоты при разных уровнях солнечной активности: для F_0=75 с.е.п. $\max(K_1^*)$=3,377 на высоте 559 км; для F_0=150 с.е.п. $\max(K_1^*)$=3,893 на высоте 736 км; для F_0=250 с.е.п. $\max(K_1^*)$=4,506 на высоте 902 км.

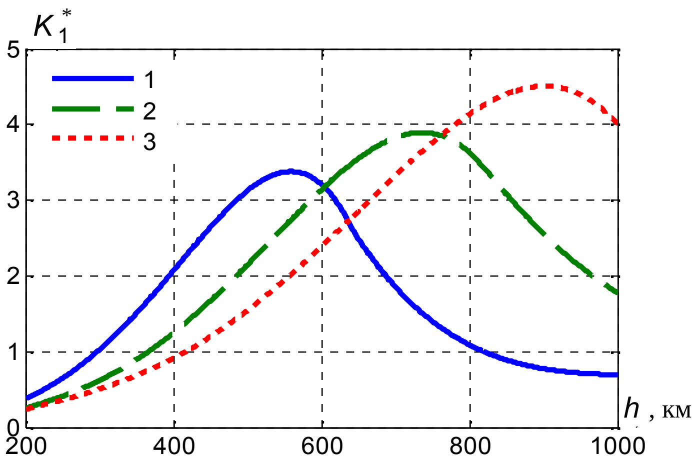

Рис. 2

Для одной и той же высоты коэффициент K_1 может меняться от 0 до значений K_1^*. Экстремальные значения коэффициента K_1 представлены в таблице 2.

Табл. 2

	F_0 = 75 с.е.п.		F_0 = 150 с.е.п.		F_0 = 250 с.е.п.	
	$\min(K_1)$	$\max(K_1)$	$\min(K_1)$	$\max(K_1)$	$\min(K_1)$	$\max(K_1)$
h = 300 км	0,000	1,022	0,000	0,618	0,000	0,506
h = 400 км		2,070		1,245		0,911
h = 500 км		3,124		2,147		1,543
h = 600 км		3,212		3,136		2,385
h = 700 км		1,855		3,826		3,322

Как видим, например, на высоте 700 км при учете только суточного эффекта коэффициент K_1 может меняться почти в 4 раза при F_0=150 с.е.п.

Полугодовой эффект распределения плотности. Коэффициент K_2, описывающий полугодовой эффект изменений плотности, задается следующим образом

$$K_2 = \left(\sum_{i=0}^{4} d_i h^i \right) \cdot A(d); \quad A(d) = \sum_{j=0}^{8} A_j d^j ,$$

где d_i ($i = 0, 1, \ldots, 4$) – заданные таблично коэффициенты [7]; $A(d)$ – множитель, характеризующий влияние полугодового эффекта на плотность атмосферы; d – число суток от начала года; A_j ($j = 0, 1, \ldots, 8$) – постоянные коэффициенты, описывающие изменение коэффициента K_2 в течение года [7]. Изменение $A(d)$ представлено на рисунке 3.

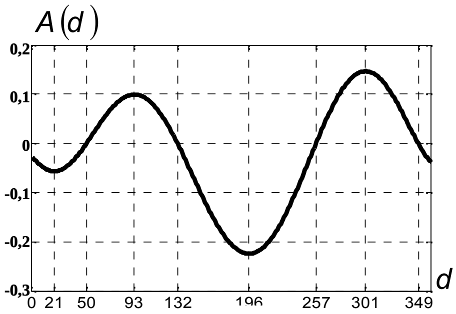

Рис. 3

Из рисунка видно, что существуют даты, когда суточный эффект не будет сказываться на плотности атмосферы (50-й, 132-й, и т.д. день). Видно, что минимальная плотность будет наблюдаться в 196-й день в году (это 16 июля либо 15 июля для високосного года), а самая большая плотность – на 301-й день в году (это 28 октября либо 27 октября для високосного года).

Экстремальные значения коэффициента K_2 представлены в таблице 3.

Табл. 3

	F_0 = 75 с.е.п.		F_0 = 150 с.е.п.		F_0 = 250 с.е.п.	
	$\min(K_2)$	$\max(K_2)$	$\min(K_2)$	$\max(K_2)$	$\min(K_2)$	$\max(K_2)$
h = 300 км	-0,291	0,190	-0,267	0,174	-0,263	0,172
h = 400 км	-0,387	0,253	-0,335	0,219	-0,320	0,209
h = 500 км	-0,462	0,302	-0,398	0,260	-0,368	0,240
h = 600 км	-0,513	0,335	-0,452	0,296	-0,409	0,267
h = 700 км	-0,539	0,352	-0,498	0,325	-0,444	0,290

Влияние изменений солнечной активности на плотность атмосферы (учет отклонения $F_{10.7}$ от F_{81}). Согласно [7] коэффициент, описывающий изменение плотности, связанное с отклонением $F_{10,7}$ от F_{81} определяется следующим образом

$$K_3 = \frac{F_{10,7} - F_{81}}{F_{81} + \left| F_{10,7} - F_{81} \right|} \cdot K_3^*, \quad K_3^* = \sum_{i=0}^{4} b_i h^i ,$$

где b_i ($i = 0, 1, \ldots, 4$) – заданные таблично коэффициенты [7].

Средневзвешенный индекс F_{81} определяется следующим образом

$$F_{81} = \frac{\sum_{i=-80}^{0} F_i W_i}{\sum_{i=-80}^{0} W_i}, \quad W_i = 1 + \frac{0,5 i}{80},$$

где F_i – индекс $F_{10,7}$ для даты с индексом i (i = 0 соответствует дате, на которую рассчитывается значение F_{81}, а i = -80 – дате, отстоящей от нее на 80 суток) [7].

Понятно, что если солнечная активность в заданную дату такая же, как и средняя за предыдущий 81 день ($F_{10,7} = F_{81}$), то K_3 =0. В случае двукратного увеличения солнечной активности, т. е. когда $F_{10,7} = 2F_{81}$, то $K_3 = 0{,}5K_3^*$. Зависимость K_3^* от высоты представлена на рисунке 4.

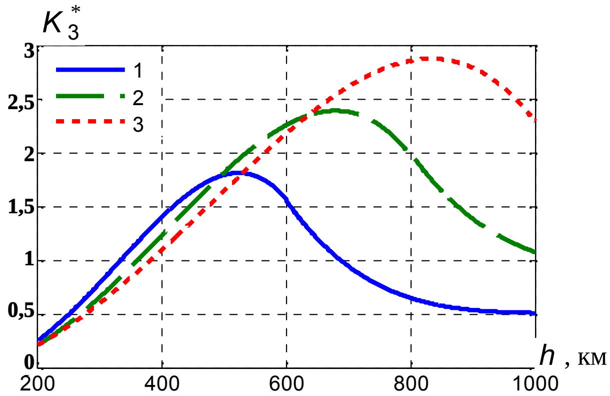

Рис. 4

Как видим, максимально возможное влияние коэффициента K_3 на плотность будет наблюдаться при большой солнечной активности на большой высоте.

Рассмотрим влияние одной произвольной вспышки (однодневной вспышки) на изменение плотности атмосферы. Для оценок примем, что предыдущие 80 дней Солнце было спокойным и, не внося больших погрешностей, можно записать, что

$$F_{81} = \frac{F_{80} \sum_{i=-80}^{1} W_i + F_{10.7} \cdot 1}{\sum_{i=-80}^{0} W_i},$$

где F_{80} – средневзвешенный индекс за предыдущие 80 дней.

Зададим коэффициент $F_{10,7}$ в виде $F_{10,7} = F_{80} \pm f$, где f – «добавка» к среднему за предыдущих 80 дней индексу солнечной активности.

Тогда

$$F_{81} = \frac{F_{80}\left(\sum_{i=-80}^{0} W_i - 1\right) + F_{80} \pm f}{\sum_{i=-80}^{0} W_i} = \frac{F_{80} \sum_{i=-80}^{0} W_i \pm f}{\sum_{i=-80}^{0} W_i} = F_{80} \pm \frac{f}{\sum_{i=-80}^{0} W_i}.$$

Отметим, что $\sum_{i=-80}^{0} W_i = 60\frac{3}{4}$.

Тогда, выражение K_3^*, описывающее изменение плотности атмосферы из-за различий между F_{81} и $F_{10,7}$, можно записать в виде

$$K_3^* = \frac{K_3}{\beta} = \frac{\pm 60\frac{3}{4} \mp 1}{\frac{F_{80}}{f} \cdot 60\frac{3}{4} \pm 1 + \left| \pm 60\frac{3}{4} \mp 1 \right|}.$$

Выражения для K_3^*, когда солнечная активность по сравнению со средним значением за предыдущие 80 дней повысилась $K_3^* \uparrow$ (или понизилась $K_3^* \downarrow$), принимают следующий вид

$$K_3^* \uparrow = \frac{239}{243} \cdot \frac{f}{F_{80} + f} \quad \text{и} \quad K_3^* \downarrow = -\frac{239 \cdot f}{243 \cdot F_{80} + 235 \cdot f}.$$

Считается, что индекс $F_{10,7}$ может изменяться от 50 с.е.п. до 300 с.е.п. [9]. На рисунке 5 построены максимальные значения коэффициентов $K_3^* \uparrow$ и $K_3^* \downarrow$ в предположении, что значение F_{80} изменяется от 60 с.е.п. до 250 с.е.п. (рисунок построен в предположении, что $F_{80} + f = \max(F_{10,7}) = 300$ с.е.п. для $K_3^* \uparrow$ и $F_{80} - f = \min(F_{10,7}) = 50$ с.е.п. для $K_3^* \downarrow$).

Из рисунка видно, что когда на фоне спокойной атмосферы с низкой солнечной активностью (F_{80} = 60 с.е.п.) наблюдается большая вспышка солнечной активности (до 300 с.е.п.), то максимальное значение коэффициента K_3^* может достигать 0,79; когда на фоне очень активного солнца (F_{80} = 250 с.е.п.) наблюдается большое падение солнечной активности (до 50 с.е.п.), то максимальное значение коэффициента K_3^* может достигать 0,62. Понятно, что такие экстремальные изменения солнечной активности почти не наблюдаются и в реальной космической обстановке значения этого коэффициента будут значительно ниже.

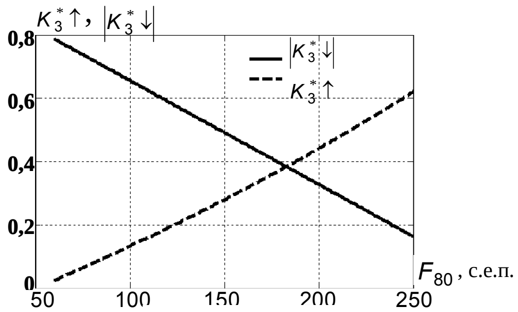

Рис. 5

Экстремальные теоретически возможные значения коэффициента K_3 (при увеличении солнечной активности до 300 с.е.п. или уменьшении до 50 с.е.п.) в зависимости от высоты и солнечной активности представлены в таблице 4.

Табл. 4

	F_0 = 75 с.е.п.		F_0 = 150 с.е.п.		F_0 = 250 с.е.п.	
	$\min(K_3)$	$\max(K_3)$	$\min(K_3)$	$\max(K_3)$	$\min(K_3)$	$\max(K_3)$
h = 300 км	-0,196	0,587	-0,260	0,325	-0,264	0,099
h = 400 км	-0,349	1,047	-0,490	0,613	-0,484	0,182
h = 500 км	-0,448	1,343	-0,724	0,905	-0,729	0,273
h = 600 км	-0,392	1,177	-0,901	1,127	-0,966	0,362
h = 700 км	-0,237	0,710	-0,952	1,189	-1,161	0,435

Влияние геомагнитной возмущенности на плотность атмосферы. Коэффициент K_4, описывающий зависимость плотности атмосферы от геомагнитной возмущенности, определяется следующим образом

$$K_4 = \sum_{i=0}^{4} e_i h^i \cdot \left(e_5 + e_6 K_p + e_7 K_p^2 + e_8 K_p^3\right),$$

где e_i $(i = 1,\ldots,8)$ – заданные таблично коэффициенты [7]; K_p – квазилогарифмический планетарный среднесуточный индекс геомагнитной возмущенности. Модель [7] позволяет рассчитывать коэффициент K_4 как при использовании квазилогарифмического планетарного среднесуточного/трехчасового индекса геомагнитной возмущенности K_p / k_p, так и при использовании планетарного среднесуточного/трехчасового индекса геомагнитной возмущенности с линейной шкалой A_p / a_p соответственно.

На следующем рисунке в качестве примера представлено изменение коэффициента K_4 в зависимости от высоты для средней солнечной активности $F_0 = 150$ с.е.п. и нескольких значений индекса K_p.

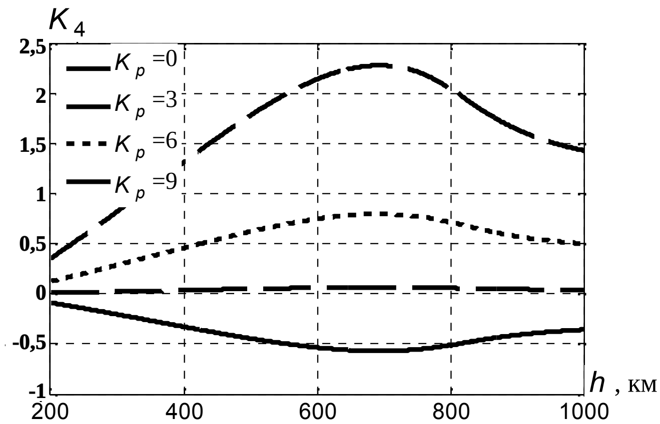

Рис. 6

Коэффициент K_4 тем больше, чем выше геомагнитная активность (коэффициент K_p). При $K_p \approx 3$ коэффициент $K_4 \approx 0$. Максимальное значение коэффициент K_4 принимает при заложенном в [7] максимальном теоретически возможном значении $K_p = 9$, однако данные из прошлого о таком большом K_p отсутствуют.

Чем выше солнечная активность, тем меньше величина экстремальных значений коэффициента K_4, но тем больше высота, для которой коэффициент K_4 принимает экстремальные значения (см. таблицу 5).

Табл. 5

	F_0 = 75 с.е.п.	F_0 = 150 с.е.п.	F_0 = 250 с.е.п.
$\max(K_4)$	3,114	2,278	1,939
$\min(K_4)$	-0,723	-0,570	-0,506
$h_{экстр}$, км	538	694	832

Экстремальные значения коэффициента K_4 представлены в таблице 6.

Табл. 6

	F_0 = 75 с.е.п.		F_0 = 150 с.е.п.		F_0 = 250 с.е.п.	
	$\min(K_4)$	$\max(K_4)$	$\min(K_4)$	$\max(K_4)$	$\min(K_4)$	$\max(K_4)$
h = 300 км	-0,334	1,439	-0,205	0,819	-0,158	0,607
h = 400 км	-0,553	2,383	-0,328	1,310	-0,244	0,936
h = 500 км	-0,706	3,045	-0,445	1,778	-0,325	1,247
h = 600 км	-0,667	2,875	-0,535	2,140	-0,397	1,523
h = 700 км	-0,466	2,010	-0,570	2,277	-0,456	1,749

Теоретически возможные экстремальные оценки плотности. Рассмотрим теоретически возможные случаи, когда коэффициенты K_i ($i = 0, 1, \ldots, 4$) достигают своих минимальных/максимальных значений.

Коэффициент K_1, описывающий суточный эффект, может быть равен нулю при рассмотрении точки, находящейся на оси симметрии атмосферного горба в тени Земли. Максимальное значение этого коэффициента K_1^* наблюдается в точке, находящейся на этой же оси, но на солнечной стороне Земли, зависит от высоты и средней солнечной активности ($F_0(F_{81})$) и приведено в таблице 2. Следует отметить, что при движении спутника в плоскости, перпендикулярной оси симметрии атмосферного горба, коэффициент K_1 будет постоянным, а в плоскости, проходящей через эту ось, будет меняться от 0 до максимального значения K_1^*.

Коэффициенты K_2, K_3, K_4 могут принимать не только положительные, но и отрицательные значения.

Коэффициент K_2, описывающий полугодовой эффект, принимает минимальное значение на 196-й день в году (это 16 июля либо 15 июля для високосного года), а максимальное – на 301-й день в году (это 28 октября либо 27 октября для високосного года).

Коэффициент K_3, описывающий изменение плотности в зависимости от изменений солнечной активности, принимает положительные значения K_3, когда текущее (среднесуточное) значение солнечной активности больше, чем среднее за предыдущий период (средневзвешенное за предшествующий 81 день) и произошла так называемая «вспышка» на Солнце; отрицательные значения – при уменьшении текущей солнечной активности по сравнению со средней за предыдущий период. В таблице 4 представлены теоретически возможные экстремально возможные значения коэффициента K_3.

Коэффициент K_4, описывающий изменение плотности атмосферы в зависимости от геомагнитной активности, принимает минимальное значение при $K_p = 0$ и максимальное – при $K_p = 9$ (см. таблицу 7); при $K_p \approx 0{,}3333$ коэффициент $K_4 = 0$.

Следует отметить, что экстремальные оценки для K_3 получены в предположении либо сильной вспышки (текущая солнечная активность $F_{10,.7}$ =300 с.е.п. при F_{81} =60 с.е.п.), либо резкого уменьшения солнечной активности (соответственно $F_{10,.7}$ =50 с.е.п. при F_{81} =250 с.е.п.). Однако данные о реальных событиях с такими резкими изменениями солнечной активности отсутствуют. Также не встречались данные о геомагнитной активности, когда индекс $K_p = 9$ [10].

Коэффициент K_0 не описывает какое-либо физическое влияние на плотность атмосферы, а описывает изменение плотности из-за отличия средней солнечной активности (F_{81}) от фиксированных в [7] уровней солнечной активности (F_0). Минимальное значение K_0 =1 наблюдается при совпадении F_{81} и F_0; максимальное – при $\left|F_{81} - F_0\right| = 12{,}5$ с.е.п.

Понятно, что беря минимально возможные значения коэффициентов K_i и умножая на плотность ночной атмосферы для данной высоты и солнечной активности, получим теоретически возможное минимальное значение плотности (соответственно для максимальной оценки берутся максимальные значения коэффициентов).

В качестве примера, в таблице 7 в зависимости от солнечной активности представлены значения плотности ночной атмосферы, экстремальные значения коэффициента $K = K_0\left(1 + K_1 + K_2 + K_3 + K_4\right)$ и соответствующие экстремальные значения плотности на высоте 300 км.

Табл. 7

	ρ_H, кг/м^3	$K_{\min}$	$K_{\max}$	$\rho_H K_{\min}$, кг/м^3	$\rho_H K_{\max}$, кг/м^3
F_0 = 75 с.е.п.	8,10e-12	0,1326	5,3356	1,07e-12	4,32e-11
F_0 = 150 с.е.п.	2,27e-11	0,2345	3,3030	5,32e-12	7,50e-11
F_0 = 250 с.е.п.	4,76e-11	0,2920	2,5580	1,39e-11	1,22e-10

Выводы. Рассмотрено влияние даты, времени суток, солнечной и геомагнитной активности на плотность атмосферы в задаваемой точке. Построены оценки диапазонов изменения коэффициентов K_i, описывающих влияние этих факторов, и определены условия, при которых наблюдаются минимальные/максимальные значения K_i для высот (300–700) км. Путем суммирования максимальных и минимальных значений коэффициентов K_i определяются границы возможных изменений плотности относительно плотности ночной атмосферы на заданной высоте при заданном фиксированном уровне солнечной активности. В качестве примера показано, что на высоте 300 км в зависимости от условий полета плотность атмосферы может меняться более чем на два порядка.

1. *Михайловский К. В., Городецкий М. А.* Разработка методики определения и коррекции параметров рабочей орбиты космического аппарата дистанционного зондирования Земли. Вестник РУДН. Серия: Инженерные исследования. 2017. Т. 18, №. 3. С. 361–372. https://doi.org/10.22363/2312-8143-2017-18-3-361-372
2. *Салмин В. В., Волоцуев В. В., Шиханов С. В.* Поддержание заданных орбитальных параметров космического аппарата с помощью двигателей малой тяги. Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. 2013. № 4 (42). С. 248–254. https://doi.org/10.18287/1998-6629-2013-0-4(42)-248-254
3. *Ходненко В. П., Хромов А. В.* Выбор проектных параметров системы коррекции орбиты космического аппарата дистанционного зондирования Земли. Вопросы электромеханики. Труды НПП ВНИИЭМ. 2011. Т. 121. № 2. С. 15–22.
4. *Лицзе В., Баранов А. А.* Оптимальное удержание космического аппарата с двигателями малой тяги на солнечно-синхронной орбите. Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». 2015. № 2. С. 68–82.
5. *Garulli A., Giannitrapani A., Leomanni M., Scortecci F.* Autonomous Low Earth Orbit Station-Keeping with Electric Propulsion. Journal of Guidance Control and Dynamics. 2011. Vol. 34, No. 6. P. 1683–1693. https://doi.org/10.2514/1.52985
6. *De Florio S., D'Amico S.* Optimal Autonomous Orbit Control of a Remote Sensing Spacecraft. Advances in the Astronautical Sciences Series. 2009. Vol. 134. P. 949–968.
7. ГОСТ Р 25645.166 – 2004 Атмосфера Земли верхняя. Модель плотности для баллистического обеспечения полетов искусственных спутников Земли. Принят 2004-03-09. М.: ИПК Изд-во стандартов, 2004. 24 с.
8. *Аль Тамими Мутанна Абдулкарим* Исследование влияния солнечной активности на глобальное влагосодержание атмосферы и интенсивность осадков: дис. ... канд. физ.-мат. наук: 25.00.30 / *Аль Тамими Мутанна Абдулкарим*. Рос. гос. гидрометеорол. ун-т (РГГМУ). Санкт-Петербург, 2016. 135 с.
9. *Маслова А. И., Пироженко А. В.* Изменения плотности атмосферы при движении космических аппаратов на низких околоземных орбитах. Космічна наука і технологія. 2009. Т. 15, № 1. С. 13–18. https://doi.org/10.15407/knit2009.01.013
10. Сайт космической погоды. URL: http://www.spaceweather.com/

Получено 24.05.2019,
в окончательном варианте 26.09.2019