

УДК 523.94; 523.98; 550.388.02

## ВЛИЯНИЕ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ НА ВАРИАЦИИ ПЛОТНОСТИ ВЕРХНЕЙ АТМОСФЕРЫ ЗЕМЛИ

© 2011 г. С. И. Болдырев, Г. С. Иванов-Холодный, О. П. Коломийцев, А. И. Осин

Учреждение РАН Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова,  
г. Троицк (Московская обл.)

e-mail: boldyrev@izmiran.ru

Поступила в редакцию 16.03.2010 г.

После доработки 14.07.2010 г.

По многолетним данным об эволюции движения трех ИСЗ (“Интеркосмос-19”, “Метеор-1-2” и “Космос-1154” на орбитах с высотами 400–1000 км исследованы долгопериодные вариации плотности верхней атмосферы Земли за несколько циклов солнечной активности. Временной интервал существования ИСЗ на орбитах охватывал три цикла солнечной активности (21-ый – частично, 22-ой – полностью и 23-ий – частично). Установлено, что вариации средней плотности верхней атмосферы на высотах 400–600 км в период 1980–2000 гг. определялись изменениями уровня солнечной активности.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Систематические исследования верхней атмосферы Земли выше 150 км (спектрометрические, ракетные, лидарные) начались с середины прошлого века. В последнее время появилась возможность привлечь для исследования длительных пространственно-временных планетарных вариаций плотности верхней атмосферы данные об эволюции орбит ИСЗ, запущенных на околоземные орбиты в 70-е–80-е годы XX века. Работа посвящена анализу этих данных.

Авторы, анализируя новые данные о торможении ИСЗ на достаточно длинном отрезке времени (20 лет), путем сравнения характеристик орбит в разные периоды цикла солнечной активности (СА), определяемого величиной потока (F10.7) солнечного излучения на волне 10.7 см., попытались уточнить связь между вариациями плотности верхней атмосферы и изменениями уровня СА. В дальнейшем авторы планируют разработать методику прогноза вариаций плотности верхней атмосферы в зависимости от изменений СА.

Настоящая работа является продолжением исследований авторами вариаций плотности верхней атмосферы Земли по траекторным данным ИСЗ серии КОРОНАС. Результаты этих исследований использовались для прогноза времени существования ИСЗ и для корректировки модели атмосферы Земли [Болдырев и др., 2005; 2006; 2007; 2008].

### 2. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

Воздействие СА на верхнюю атмосферу Земли характеризуется двумя составляющими, а именно: интегральной составляющей, определяемой цик-

личной СА, в частности, 11-летней периодичности, и спорадической составляющей, определяемой мощными нестационарными геоэффективными событиями в солнечной атмосфере (вспышки, выбросы корональной массы и т.п.)

При возрастании уровня СА (интегральной составляющей) верхняя атмосфера Земли нагревается и ионизируется солнечным излучением – как электромагнитным, так и корпускулярным. Растет шкала высот, атмосфера расширяется, обуславливая соответствующие пространственно-временные вариации концентрации составляющих верхнюю атмосферу газов и плотности верхней атмосферы Земли. Естественно, что со спадом СА идут обратные изменения. Этот процесс является одним из основных внешних факторов, определяющих изменения скорости снижения “низкоорбитальных” ИСЗ.

Реакция верхней атмосферы на СА имеет достаточно сложный характер и описана многими авторами, например, [Акасофу и Чепмен, 1974; 1975; Харгривс, 1982; Иванов-Холодный и Нусинов, 2006.]

Чувствительными к изменениям плотности верхней атмосферы оказались ИСЗ, орбиты которых находились на высотах 400–600 км, так называемые “низкоорбитальные” спутники.

Для проведения анализа траекторных характеристик долгоживущих ИСЗ авторы взяли данные о траекториях трех спутников: “Интеркосмос-19” (ИК-19), “Метеор-1-2” и “Космос-1154” за временной интервал 1980–2000 гг. Использовались данные наблюдений за движением ИСЗ Годдардского центра NASA с Интернетсайта группы орбитальной информации (Orbital Information Group-OIG). Также использовались данные об индексах солнечной и геомагнитной активности с Интернет-

сайтов мировых центров и центра прогнозов ИЗМИРАН.

При анализе долговременной эволюции орбит спутников необходимо годовое осреднение полученных данных о торможении ИСЗ для исключения или максимального снижения уровня влияния ошибок измерений и гелиогеофизических условий, для которых они получены. Данные о торможении для коротких интервалов времени относятся к различным значениям СА и геомагнитной возмущенности. Кроме того, они получены в разное время года при различных взаимных положениях орбиты ИСЗ и Солнца.

В дальнейших своих работах авторы планируют провести анализ тонкой структуры эволюции траекторий ИСЗ под воздействием спорадической составляющей СА.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ АНАЛИЗ

Для проведения анализа и поиска корреляции на рис. 1 приведена временная диаграмма изменения уровня СА. Результаты обработки спутниковых данных представлены на рис. 2. И наконец, для оценки плотности верхней атмосферы на высотах перигея орбит ИСЗ для разной солнечно-геофизической обстановки на рис. 3 построена диаграмма вариаций плотности верхней атмосферы Земли  $\rho$ , рассчитанная по модели атмосферы WMA01 для временного периода 1980–2000 гг. [Иванов-Холодный и др., 2001].

На рисунке 1 приведена диаграмма вариаций потока солнечного излучения в период 1980–2000 гг. по параметру  $F_{10.7}$ , характеризующему уровень СА (три цикла: 21-ый, 22-ой и 23-ий) [Solar Geophysical Data, 2001]. Мы имеем полный 22-ой цикл СА в центре диаграммы (от минимума до минимума, 1985.5–1996 гг.), спадающую ветвь 21-го цикла СА 1981–1985.5 гг. и восходящую ветвь 23-го цикла СА 1996–2000 гг. На рисунке 1 видны все особенности 22-го цикла СА.

На рисунке 2 приведена диаграмма вариаций скорости снижения перигея орбит спутников по их орбитальным данным во временном интервале 1980–2000 гг.: график 1 – ИК-19, график 2 – “Метеор-1-2” и график 3 – “Космос-1154”.

Скорость снижения спутника определяется габаритно-массовыми характеристиками и орбитальными параметрами спутника, а также плотностью слоев верхней атмосферы на данной высоте. Нулевой уровень графика на рис. 2 означает лишь тот факт, что спутник движется в среде с постоянной плотностью. Минимальная скорость снижения спутника для разных высот своя и определяется она плотностью невозмущенной верхней атмосферы.

С ростом активности Солнца растет и плотность возмущенной верхней атмосферы Земли (на каждой конкретной высоте).

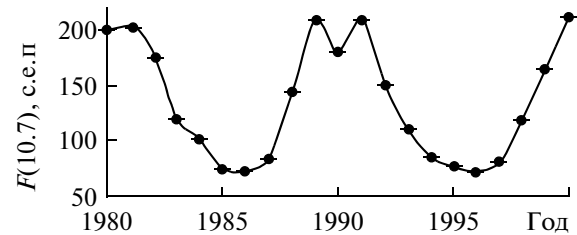


Рис. 1. Диаграмма изменений потока солнечного радиоизлучения ( $F_{10.7} \times 10^{-22}$ ) в период 1980–2000 гг., характеризующего уровень солнечной активности, для 21-ого, 22-ого и 23-его циклов солнечной активности.

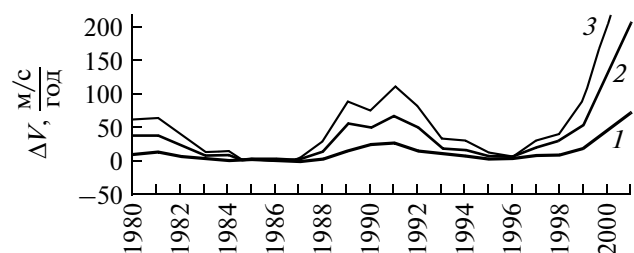


Рис. 2. Диаграмма вариаций скорости снижения перигея орбит ИСЗ в период 1980–2001 гг. Графики: 1 – ИК-19, 2 – “Метеор-1-2”, 3 – “Космос-1154”.

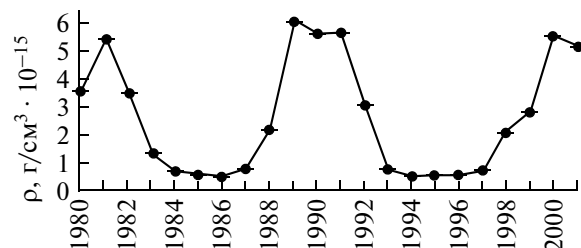


Рис. 3. Диаграмма изменений плотности верхней атмосферы Земли, рассчитанной для высоты 450 км и широты 45° в период 1980–2000 гг.

На диаграмме рис. 2 выделяются четыре основных области характерных изменений скорости снижения ИСЗ, которые могут быть обусловлены воздействием на верхнюю атмосферу Земли солнечной активности 21-го, 22-го и 23-го циклов.

Первая область графиков – это уменьшение скорости снижения перигея орбит ИСЗ до некоторого минимального значения, определяемого плотностью соответствующих слоев верхней атмосферы (габаритно-массовые характеристики спут-

ников здесь не обсуждаем), в период 1981–1986 гг., т.е. во время спадающей ветви 21-го цикла СА.

Вторая область графиков — это возрастание скорости снижения перигея орбит ИСЗ до некоторого максимального значения, определяемого максимумом 22-го цикла СА, в период 1986–1991 гг. Здесь необходимо отметить, что на рис. 1 выделяются два максимума СА в 22-ом цикле (два пика потока солнечного радиоизлучения). Эта особенность прослеживается и на рисунках 2 и 3.

Третья область графиков — это уменьшение скорости снижения перигея орбит ИСЗ до некоторого минимального значения в период 1991.0–1996.0 гг., т.е., во время спадающей ветви 22-го цикла СА.

Четвертая область графиков — это возрастание скорости снижения перигея орбит ИСЗ до некоторого максимального значения, определяемой максимумом 23-го цикла СА, в период 1996–2001 гг.

Надо отметить, что амплитуда вариаций скорости снижения спутника тем больше, чем ниже по высоте располагается его орбита, и чем выше орбита, тем менее чувствителен спутник к вариациям плотности верхней атмосферы.

Это подтверждается и для наших спутников. ИСЗ “Интеркосмос-19” имеет эллиптическую орбиту с начальными параметрами: апогей = 1000 км и перигей = 500 км (1979 г.). ИСЗ “Метеор-1-2” имеет почти круговую орбиту с начальными параметрами: апогей = 680 км и перигей = 620 км (1970 г.). ИСЗ “Космос-1154” имеет круговую орбиту с начальными параметрами: апогей = 640 км и перигей = 630 км (1980 г.).

С помощью эмпирической модели верхней атмосферы Земли WMA01 [Иванов-Холодный и др., 2001], разрабатываемой в ИЗМИРАН, были проведены оценки плотности атмосферы для высот перигея орбит ИСЗ 400–450 км для средних широт и разной солнечно-геофизической обстановки.

На рисунке 3 приведены графики вариаций плотности верхней атмосферы, рассчитанных по модели WMA01 для временного периода 1980–2000 гг. Фаза и амплитуда изменений плотности на графике полностью совпадают с графиками изменения уровня СА и вариаций скорости снижения перигея орбит спутников.

#### 4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Вариации плотности верхней атмосферы Земли, определенные по характеру торможения спутников Земли, находятся в полном соответствии с 11-летними изменениями уровня СА в течение 3-х последних циклов (100%-ая корреляция). Фаза и амплитуда изменений плотности полностью совпадают с изменениями уровня СА и вариациями скорости снижения перигея орбит спутников. Это продемонстрировано на рисунках 1 и 2.

Необходимо обратить внимание на сложный характер максимума 22-го цикла солнечной активности, который нашел свое отражение и в движении спутников, т.е. в вариациях плотности верхней атмосферы Земли. Два пика этого максимума разделены интервалом времени в два года.

#### 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время появилась возможность привлечь для исследования длительных пространственно-временных планетарных вариаций плотности верхней атмосферы данные об эволюции орбит спутников, запущенных на околоземные орбиты в 70-е – 80-е годы XX века. В данной работе спутники используются как инструменты для исследования верхней атмосферы Земли.

Принцип отбора спутников (вернее данных о траекториях) состоял в том, чтобы траектория орбиты (круговой или эллиптической) спутника находилась на высотах верхней атмосферы Земли, чувствительной к уровню СА (см., например, [Болдырев и др., 2009]).

По данным изменений высоты перигея орбит спутников “Интеркосмос-19”, “Космос-1154” и “Метеор-1-2” за период 1980–2000 гг. проанализирована информация о вариациях плотности верхней атмосферы на высотах 400–1000 км. Авторы в дальнейшем планируют расширить количественный состав спутников и собрать определенную статистику.

Получено, что на отрезке времени 1980–2000 гг. вариации плотности верхней атмосферы Земли на рассматриваемых высотах полностью соответствуют вариациям уровня СА (со 100%-ой корреляцией).

Значения плотности на высоте 450 км (см. рис. 3) в зависимости от уровня активности Солнца изменяются на порядок, от  $6 \times 10^{-16}$  г/см<sup>3</sup> в минимуме СА (1986 г.) до  $6 \times 10^{-15}$  г/см<sup>3</sup> в максимуме СА (1989 г.)

Результаты этих исследований имеют и прикладной характер. Прогноз продолжительности нахождения спутника на околоземной орбите строится на знании реакции верхней атмосферы (изменении плотности) на воздействие внешних факторов, в данном случае, уровня долгопериодной циклической солнечной активности и соответствующих ей геоэффективных событий.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Акасофу С.-И., Чепмен С. Солнечно-земная физика. // Ч. 1. М.: Мир, 382 с. 1974.
- Акасофу С.-И., Чепмен С. Солнечно-земная физика // Ч. 2. М.: Мир, 509 с. 1975.
- Болдырев С.И., Иванов-Холодный Г.С., Коломийцев О.П., Кузнецов В.Д., Афанасьев А.Н., Осин А.И. Эволюция орбиты ИСЗ КОРОНАС-Ф и прогноз времени его

- существования // Астрон. вестн. Т. 39. № 6. С. 563–570. 2005.
- *Болдырев С.И., Иванов-Холодный Г.С., Коломийцев О.П.* Проблемы прогнозирования времени существования низкоорбитальных ИСЗ // Сб. науч. тр. “Научная сессия МИФИ-2006”. Т. 7. С. 30–31. 2006.
- *Болдырев С.И., Иванов-Холодный Г.С., Коломийцев О.П., Осин А.И.* Особенности эволюции орбиты ИСЗ КОРОНАС-Ф на заключительной стадии своего полета // Астрон. вестн. Т. 41. № 5. С. 453–457. 2007.
- *Болдырев С.И., Коломийцев О.П., Иванов-Холодный Г.С., Осин А.И.* Возможности прогнозирования времени активного существования ИСЗ в условиях минимума 24-го цикла солнечной активности // Сб. науч. тр. “Научная сессия МИФИ-2008”. Т. 9. С. 123–127. 2008.
- *Болдырев С.И., Коломийцев О.П., Иванов-Холодный Г.С., Осин А.И.* Зависимость характеристик верхней атмосферы Земли от солнечной активности по данным ИСЗ серии КОРОНАС и “Интеркосмос” и их учет в динамической модели атмосферы // Сб. науч. тр. “Научная сессия МИФИ-2009”. Т. 4. С. 50–53. 2009.
- *Иванов-Холодный Г.С., Канониди Х.Д., Коломийцев О.Р., Ораевский В.Н., Суроткин В.А.* Прогноз состояния верхних слоев атмосферы Земли на заключительном этапе полета орбитального комплекса “МИР” // Космонавтика и ракетостроение. ЦНИИМаш. Т. 25. С. 165–175. 2001.
- *Иванов-Холодный Г.С., Нусинов А.А.* Коротковолновое излучение Солнца и его воздействие на атмосферу Земли. Энциклопедия низкотемпературной плазмы // М.: Янус-К. Серия Б. Т. 5. Ч. 1. С. 389–419. 2006.
- *Харгривс Дж.К.* Верхняя атмосфера и солнечно-земные связи. Л.: Гидрометеиздат. 351 С. 1982.
- Solar Geophysical Data, NOAA, Boulder USA. № 678. Part 1. 2001.