

УДК 53.02:53.087.4

ИОННЫЙ СОСТАВ ЭКЗОСФЕРЫ ЗЕМЛИ В ПЕРИОД СМЕНЫ МАГНИТНЫХ ПОЛЮСОВ СОЛНЦА

© 2021 г. М. С. Иванов^{1,*}, В. Б. Лапшин^{1,**}

Представлено академиком РАН Г.А. Жеребцовым 11.09.2020 г.

Поступило 11.09.2020 г.

После доработки 18.12.2020 г.

Принято к публикации 22.12.2020 г.

В статье представлен анализ данных измерений ионного состава верхней атмосферы на высотах 810–830 км в период 2009–2018 гг., полученных масс-спектрометрами “РИМС”, установленными на космических аппаратах “Метеор-М № 1, № 2”. Проведено сопоставление пространственно-временной изменчивости концентрации O^+ с солнечной активностью (числа Вольфа) в период инверсии магнитного поля Солнца. Обнаружено, что инверсия магнитного поля произошла в период максимума 24 солнечного цикла и сопровождалась значительным увеличением концентрации O^+ .

Ключевые слова: солнечная активность, ионный состав экзосферы земли, инверсия магнитного поля, космическая система “Метеор-М” солнечно-синхронизованная орбита

DOI: 10.31857/S2686739721040083

Солнечная обсерватория Уилкокса (WSO) начала проводить ежедневные наблюдения за магнитным полем Солнца начиная с мая 1975 г. С мая 1976 года в WSO ежедневно выпускаются карты магнитного поля Солнца [1]. Смена полюсов Солнца наблюдалась в апреле 2001 г. [2–4]. Используя данные WSO и измерения концентраций ионов H^+ , He^+ , N^+ , O^+ , H_2O^+ на высотах 810–830 м масс-спектрометрами “РИМС”, разработанными Институтом прикладной геофизики им. акад. Е.К. Федорова и установленными на космических аппаратах “Метеор-М № 1, № 2”, исследовано влияние инверсии магнитного поля Солнца на ионный состав экзосферы Земли [5]. Измерение ионного состава экзосферы Земли в институте проводится с 2009 г. по настоящее время.

Спутники “Метеор-М” № 1, № 2 включены в “Единую территориально-распределенную информационную систему дистанционного зондирования Земли” (ЕТРИС ДЗЗ). Они запущены на круговую солнечно-синхронизованную орбиту, на борту спутников установлены масс-спектрометры РИМС. Датчики приборов РИМС, ориентированные вдоль траекторий КА “Метеор-М”

навстречу ионному потоку, измеряют амплитуды тока тепловых ионов. Измерения проводятся два раза в день, начало измерений примерно в 6 и 18 ч по московскому времени (МСК). Длительность каждого сеанса измерений – 102 мин [5]. Во время сеанса измерений спутник совершает один полный оборот. Каждые 20 с (соответствуют 80 км траектории спутника) проводится измерение амплитуд ионных токов по атомным массам. Измерение ведется в двух диапазонах – легкие ионы (1–4 а.е.м.) и тяжелые ионы (4–20 а.е.м.). Полное количество измерений составляет 305 за один сеанс, причем синхронно работают два спутника с небольшим сдвигом по времени (не более 1 ч).

Точность измерения концентраций O^+ составляет 5000 N/cm^3 . Диапазон изменчивости O^+ в экзосфере в период наблюдений составлял $0–50000 \text{ N/cm}^3$.

Ежедневно со спутников поступают 4 таблицы данных, в год – 1460 в следующем формате:

File	RIMS_10015_01699.DD7
Date	15.01.2010
Frames	305

Таблица данных амплитуд концентраций ионов формируется в следующем виде (ТВ – текущее время от начала суток в секундах):

¹ Институт прикладной геофизики им. Е.К. Федорова, Росгидромет, Москва, Россия

*E-mail: mi_ivanov@list.ru

**E-mail: lapshin-vb1@mail.ru

Время	ТВ	Широта	Долгота	Высота	H ⁺	He ⁺	H ₂ O ⁺	N ⁺	O ⁺
5 : 14 : 15	18 855	81.18	197.04	809.44	0	0	0	0	38

Траектории спутников проходят по основным зонам аномального магнитного поля Земли: Бразильская, Сибирская, моря Уэдделл и Канадская аномалии [6]. Измерения с “Метеор-М № 1” проводятся с 2009 г. (РИМС-1), а “Метеор-М № 2” с 2014 г. (РИМС-2) по настоящее время.

Для сопоставления данных масс-спектрометров с данными солнечной активности был выбран массив данных из широтной полосы 5°–15° северного полушария.

На рис. 1 приведены графики солнечной активности (числа Вольфа) и измеренной концентрации ионов в период 24-го солнечного цикла.

В результате совместного анализа солнечной активности и временного хода O⁺ в период с 2009 по 2018 г. обнаружено аномальное поведение O⁺ во время инверсии магнитного поля Солнца с июля 2013 по февраль 2014 г. (рис. 1, 2 и 3).

Анализ данных измерений O⁺ показал следующее: в период с января 2011 г. по апрель 2013 г. прослеживается устойчивая 27-суточная изменчивость O⁺; с апреля по июнь 2013 г. наблюдаются увеличение периода изменчивости от 27 до 45 сут; далее с июня 2013 г. по январь 2014 г. наблюдается цикличность с периодом приблизительно два ме-

сяца; с января по апрель 2014 г. период цикличности уменьшается от 45 до 27 сут; после чего 27-суточная цикличность восстанавливается и становится устойчивой вплоть до конца 2018 г. (рис. 2 и 3).

Время инверсии магнитного поля Солнца составляет приблизительно 11.5 мес. Причем в начале и конце инверсии наблюдается резкое изменение амплитуды O⁺. При этом амплитуда в зоне основной инверсии составляет около 30000 N/cm³, максимальное значение O⁺ достигает 50000 N/cm³, а минимальное значение O⁺ уменьшается практически до нуля (рис. 3). Аномально высокие амплитуды флуктуаций значений O⁺ в начале и в конце инверсии связаны с особенностями солнечного излучения при совпадении инверсии магнитного поля Солнца и максимума солнечной активности.

Следует отметить, что инверсия 2013–2014 гг. магнитного поля Солнца происходит в период максимума солнечной активности и сопровождается значительным увеличением концентрации O⁺.

Аномальное поведение цикличности O⁺ в период инверсии магнитного поля Солнца связано с увеличением интенсивности корпускулярного,

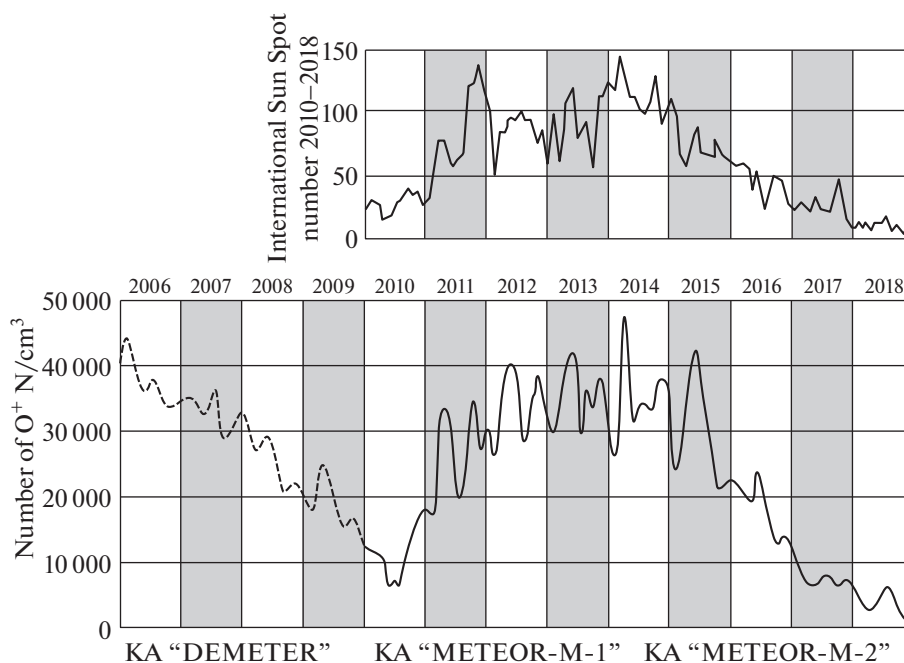


Рис. 1. Солнечная активность (числа Вольфа) и концентрация ионов O⁺ в период 24-го солнечного цикла по данным российских космических аппаратов “Метеор-М № 1, № 2” (приборы РИМС) с 2009 по 2018 г. и европейского космического аппарата “DEMETER” с 2006 по 2009 г.

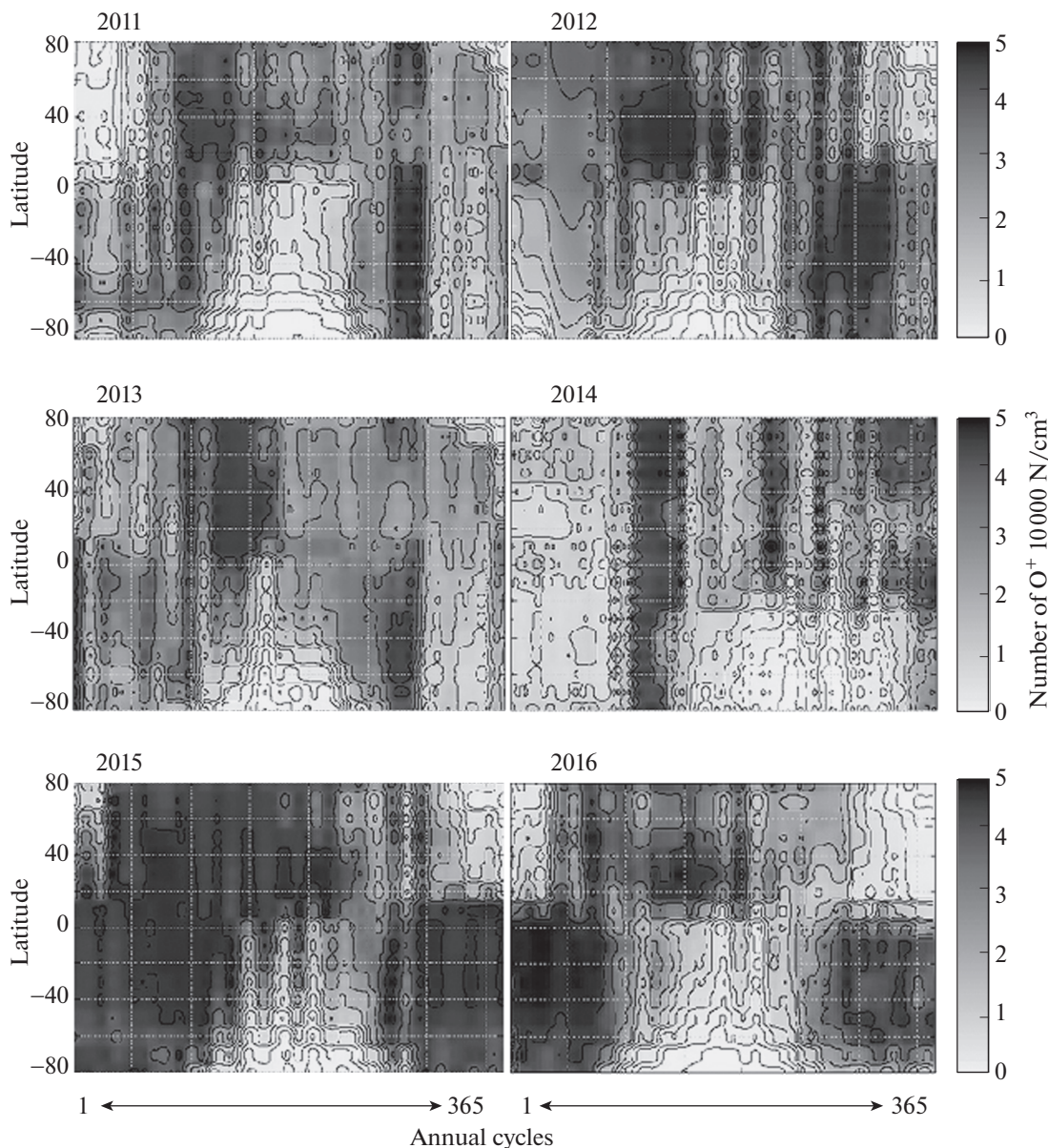


Рис. 2. На рисунке представлены данные изменчивости концентрации O^+ в диапазоне широт 82° с.ш.– 82° ю.ш. в период 24-го цикла солнечной активности с 2011 по 2016 г. Представленные циклы построены по данным наблюдения концентраций O^+ во время ежедневных измерений (305 измерений за полный оборот).

рентгеновского и ультрафиолетового излучений в окрестности максимума солнечной активности [7].

ВЫВОДЫ

1. Анализ наблюдений концентраций O^+ , выполненных прибором РИМС (“Метеор-М № 1, № 2”) с 2010 по 2018 г., выявили аномальное поведение концентрации O^+ в экзосфере Земли (810–830 км) в период инверсии магнитного поля Солнца (июль 2013–январь 2014 гг.).

2. Анализ данных измерений O^+ показал следующее: в период с января 2011 г. по апрель 2013 г.

прослеживается устойчивая 27-суточная изменчивость O^+ ; с апреля по июнь 2013 г. наблюдается увеличение периода изменчивости от 27 до 45 сут; далее с июня 2013 г. по январь 2014 г. наблюдается неупорядочная цикличность с периодом приблизительно два месяца; с января по апрель 2014 г. период цикличности уменьшается от 45 до 27 сут; после чего 27-суточная цикличность восстанавливается и становится устойчивой вплоть до конца 2016 г. (рис. 2, 3).

3. Время инверсии магнитного поля Солнца составляет приблизительно 11,5 мес. Причем в начале и конце инверсии наблюдается резкое из-

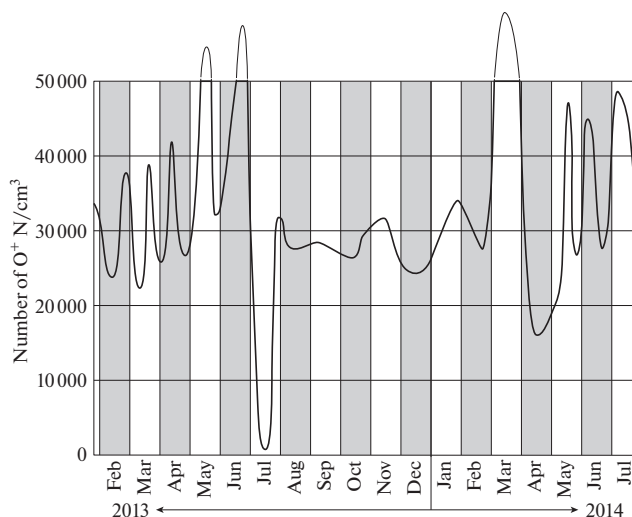


Рис. 3. Временная изменчивость концентрации O^+ вдоль экватора в период инверсии геомагнитного поля. Пунктирными линиями показаны результаты интерполяции экстремальных значений O^+ .

менение амплитуды O^+ . При этом амплитуда в зоне инверсии составляет около 30000 N/cm^3 , максимальное значение O^+ достигает 50000 N/cm^3 , а минимальное значение O^+ уменьшается практически до нуля.

4. Показано, что инверсия магнитного поля происходила в период максимума 24-го солнеч-

ного цикла и сопровождалась значительным увеличением концентрации O^+ .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. The Wilcox Solar Observatory, Astrophysics and Cosmology (KIPAC), May 1975.
2. Hathaway D.H. // Living Reviews in Solar Physics. December 2010, 7: 1.
3. Hathaway D.H. Wilson, Reichmann // Solar Physics. 1994. 151. 177.
4. Hoeksema J.T. The Heliospheric Magnetic Field, Solar Observations of Global Solar Magnetic and Velocity Fields, in The Sun as a Variable Star, IAU Coll. 143, ed. Pap, et al., Cambridge Univ. Press, 138–146, 1994 Wind 7, eds. E. Marsch, R. Schwenn, Pergamon Press, 1992. 191.
5. Иванов М.С., Кирюшов Б.М., Николаев Е.Н., Похунков А.А., Похунков С.А., Тулинов Г.Ф. Радиочастотный измеритель массового состава – эффективный прибор для мониторинга состава верхней атмосферы с борта космического аппарата // Конф. ВНИИЭМ. 2016.
6. Иванов М.С., Лапшин В.Б., Репин А.Ю. Роль геомагнитных аномалий в распределении концентрации ионов O^+ с учетом сезонного положения солнца по данным космического комплекса “Метеор-М” // ДАН. 2018. Т. 481. № 1.
7. Иванов М.С. и др. Мир измерений. Космическая погода. Мониторинг состава ионов в экзосфере. 2019. С. 26.

IONIC COMPOSITION OF THE UPPER ATMOSPHERE OF THE EARTH DURING THE PERIOD OF INVERSION OF THE SOLAR MAGNETIC FIELD

M. S. Ivanov^{a,#} and V. B. Lapshin^{a,##}

^a E.K. Fiodorov Institute of the Applied Geophysics, Rosgidromet, Moscow, Russian Federation

[#]E-mail: mi_ivanov@list.ru

^{##}E-mail: lapshin-vb1@mail.ru

Presented by Academician of the RAS G.A. Zherebtsov September 11, 2020

The article presents an analysis of the data of measurements of the ionic composition of the upper atmosphere at altitudes of 810–830 km in the period 2009–2018 received by mass spectrometers “RIMS”, installed on spacecraft “Meteor-M № 1, № 2”. The space-time variability of the O^+ concentration is compared with solar activity (Wolf number) during the period of inversion of the solar magnetic field during the period of inversion of the solar magnetic field. It was found that the reversal of the magnetic field occurred during the maximum of the 24th solar cycle and was accompanied by a significant increase in the concentration of O^+ .

Keywords: solar activity, ionic composition of the earth’s exosphere, inversion of the magnetic field, space system “Meteor-M”, solar-synchronized orbit