

УДК.550.510.535

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СЕЙСМИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ НА ИОННЫЙ СОСТАВ ВЕРХНЕЙ ИОНОСФЕРЫ

А. А. Похунков, Г. Ф. Тулинов, С. А. Похунков, В. В. Рыбин

Представлены результаты измерений и анализа изменений ионного состава верхней ионосферы Земли на высотах около 820 км, полученные с помощью радиочастотного масс-спектрометра РИМС-М на борту космического аппарата Метеор-3М в зависимости от сейсмоактивности планеты. Выявляется практически постоянное присутствие аномально высоких относительных концентраций лёгких ионов – водорода и гелия – над ближайшими окрестностями районов высокой сейсмической активности. Отмечено резкое увеличение концентраций лёгких ионов накануне и в течение длительного (более двух недель) времени после разрушительных землетрясений с магнитудой более 6. Обсуждается причинно-следственная связь этих событий.

ВВЕДЕНИЕ

Для исследований ионного состава верхней ионосферы Земли на космический аппарат Метеор-3М был установлен радиочастотный масс-спектрометр РИМС-М. Космический аппарат Метеор-3М был выведен на орбиту 17 сентября 2009 года. Наклонение орбиты -82° , высота 810-830 км. Прибор РИМС-М позволяет регистрировать ионный состав в двух массовых диапазонах: 1-4 а.е.м. (ионы атомарного и молекулярного водорода, гелия) и 5-20 а.е.м. (ионы атомарного азота и атомарного кислорода, воды). По программе проводятся ежесуточные измерения на двух активных витках, разделённых интервалом около 12 часов.

В сейсмически активных районах из земных недр выделяются различные газы. Так, в частности, по данным [1], в эпицентре Дагестанского землетрясения в 1970 году из разрывов осадочного чехла в течение длительного времени (около двух месяцев) наблюдалось истечение в атмосферу глубинных газов (H_2 , He, CH_4 и др.). При этом содержание H_2 было на 5-6 порядков, а содержание He и CH_4 – на 2-3 порядка выше их среднего содержания в воздухе. Лёгкие фракции (водород и гелий) всплывают в атмосфере и могут достигать больших высот, взаимодействуя на своём пути с ионами атмосферы. В результате перезарядных процессов образуются ионы лёгких газов, локальные концентрации которых будут превышать равновесные средние содержания атмосферных ионов и которые может

регистрировать ионный масс-спектрометр. Такая изменчивость ионного состава уже отмечалась в работах [2, 3], где исследовалось уменьшение среднего молекулярного веса ионов атмосферы под влиянием сейсмической активности.

АНАЛИЗ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ИОНОВ

Анализ распределения ионов газов по орбитам показывает, что преобладающие лёгкие ионы появляются над районами планеты с высокой сейсмической активностью. По данным настоящего анализа сейсмоактивные регионы таким образом проявляются: 1) В Тихом океане, западнее Южной Америки и в центральной его части, 2) На территории Мексики и горного массива на западе США, 3) В районе Карибского моря и Мексиканского залива, 4) В районе и ближайших окрестностях горного массива Гималаев, 5) В Индийском океане, от Антарктиды до точек западнее Австралии и Индонезии, 6) От Индонезии до Тибета и Монголии.

В соответствии с приведёнными здесь данными, масс-спектрометр РИМС-М на КА Метеор-3М можно рассматривать по отношению к основной его функции измерителя ионного состава верхней ионосферы как своеобразный дополнительный монитор для диагностики и количественной оценки протяжённости и уровня сейсмической активности районов Земли, над которыми пролетает КА. Соотношение между концентрациями ионов лёгких газов и атомарного кислорода (основного в

невозмущенных условиях иона) здесь можно рассматривать ориентировочно в качестве параметра, характеризующего интенсивность в данный момент сейсмических процессов в Земле. Превышения концентраций ионов водорода и гелия являются заметными величинами и на некоторых участках орбиты иногда сравнивались или даже полностью замещали атмосферный атомарный кислород.

Следует заметить, что в разных сейсмоактивных районах выбросы газов из недр Земли могут сильно различаться. Так, например, после сильного землетрясения в окрестностях Японии 11 марта 2011 года, сопровождавшегося сильным цунами, в верхней ионосфере произошли локальные изменения (в районе Тихого океана) в составе

лёгких ионов. На рис.1 для этого дня показаны графики изменчивости ионов вдоль орбиты КА Метеор-3М. Из этого рисунка видно, что 11-го марта основным ионом в глобальном масштабе в верхней ионосфере оставался ион атомарного кислорода. Для более наглядной иллюстрации распределение ионов вдоль орбиты для 11-го марта показано на рис. 2, где орбита нанесена на карту Земли, где концентрации измеренных ионов нанесены на траекторию в каждой точке в виде цветных квадратов, площадь которых пропорциональна концентрации (белый квадрат – ион атомарного водорода, зелёный – молекулярный водород, жёлтый – гелий, малиновый – атомарный азот, синий – атомарный кислород).

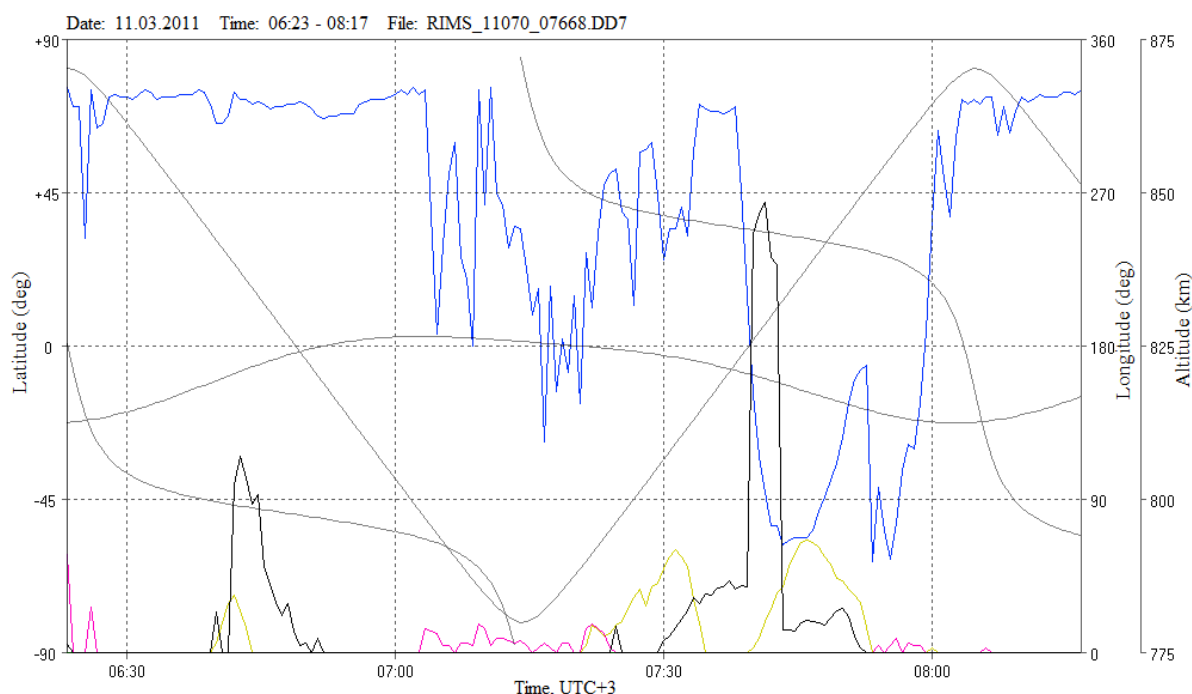


Рис.1. Распределение ионов H_1^+ , He^+ и O_1^+ по широте вдоль орбиты КА Метеор-3М в весеннем равноденствии 11.03.2011 г., утро 06ч23мин – 08 ч 17 мин МСК (РИМС-11070-07668). Широта показана в пределах от +81,2 до –81,2 и от –81,2 до +81,2 полномасштабной квазисинусоидой, долгота в пределах от 0 до 360 градусов показана волнистой кривой. В центре рисунка показана высота орбиты малой синусоидой в пределах от 811 до 827 км. Ионы показаны разными цветами: H_1^+ – чёрная кривая, He^+ – жёлтая, O_1^+ – синяя.

Доминирующим компонентом на всей орбите является ион O_1^+ со сложной слоистой структурой.

Ионы He^+ наблюдаются на 3-х участках орбиты: 1) В восточном полушарии над Китаем и Индией между точками (31 с.ш., 88 в.д. - 19 с.ш., 85 в.д.) в пределах до 9% от концентрации ионов O_1^+ ; 2) Над Тихим океаном, западнее Чили и Перу (63 ю.ш., 90 з.д. – 18 ю.ш., 110 з.д.), в пределах до 24% от атомарных ионов кислорода; 3) От точки в Тихом океане западнее Колумбии (2 с.ш., 112 з.д.) до точки западнее США (44 с.ш., 124 з.д.) в уже сравнимых с концентрациями ионов атомарного кислорода (до 98%).

Ионы H_1^+ наблюдаются на 2-х участках: 1) В восточном полушарии над Китаем и Индией (32 с.ш., 89 в.д. – 2 ю.ш., 80 в.д.) – в пределах до 37%; 2) В западном полушарии над Тихим океаном от точки западнее Чили (35 ю.ш., 104 з.д.) до точки западнее США (44 с.ш., 124 з.д.) в пределах до 25% от концентрации ионов кислорода. На этом участке траектории в пределах (0 с.ш., 112 з.д. – 10 с.ш., 115 з.д.) на протяжении около 1100 км наблюдалось локально резкое увеличение концентрации ионов атомарного водорода до 200-305% от концентрации ионов атомарного кислорода. Природа такого резкого аномально высокого и ограниченного по протяжённости увеличения, вероятнее всего, обусловлена активизацией сейсмических процессов в бассейне Тихого океана.

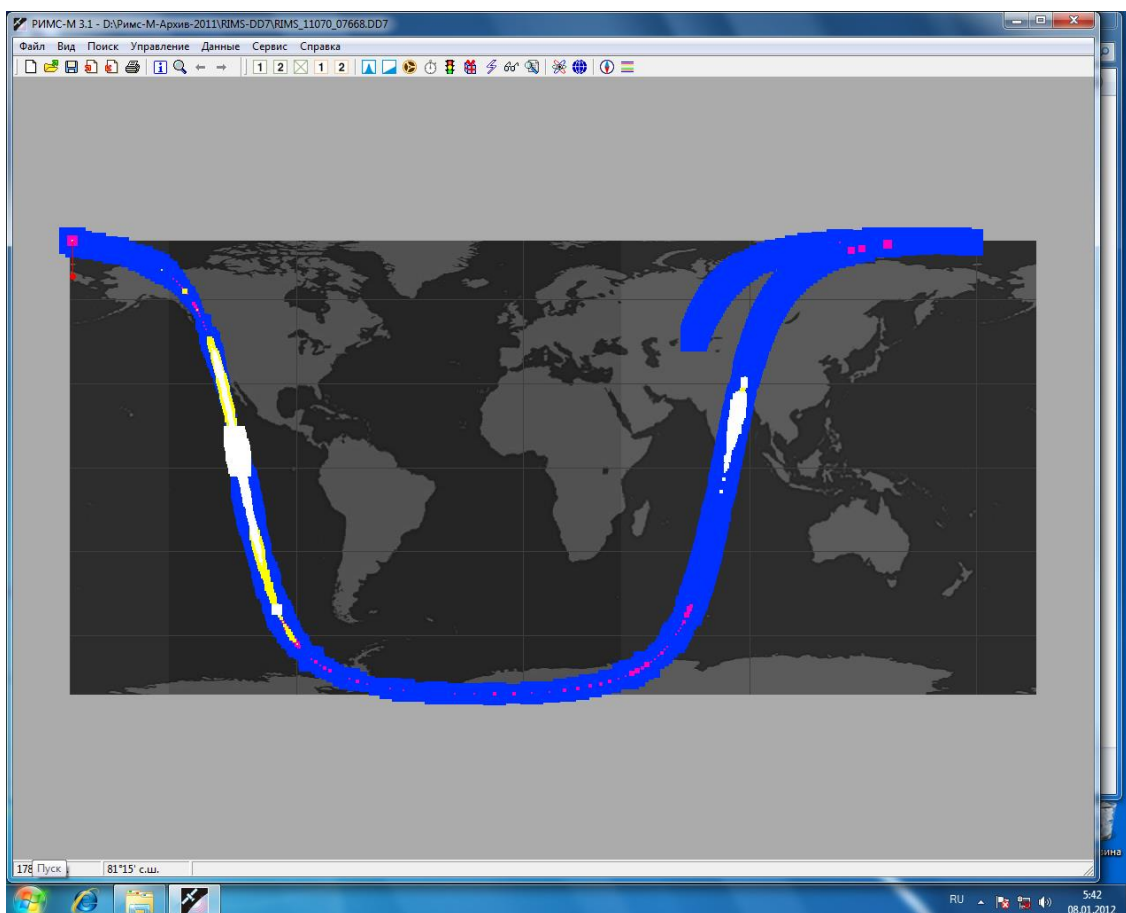


Рис.2. Распределение ионов вдоль орбиты КА Метеор-3М 11 марта 2011 года в период 06ч23мин-08ч17мин МСК (орбита 11070-07668). Доминирующим ионом на всей орбите является ион атомарного кислорода (синий цвет) - основной ион ионосферы этих высот (820 км). Ион атомарного водорода представлен белым цветом.

В верхней ионосфере вдоль орбиты КА Метеор-3М в этот день в восточном полушарии на участке (31,0° с.ш., 88,3° в.д. – 19,2° с.ш., 85° в.д.) концентрация ионов гелия менялась в пределах 2-10% от концентрации ионов основного компонента атомарного кислорода. Более высокие концентрации ионов гелия отмечались в западном полушарии над восточной частью Тихого океана, западнее побережья Южной и Северной Америк: концентрации ионов гелия менялись в пределах (0-24)% на участке (63° ю.ш., 90° з.д. – 18° ю.ш., 110° з.д.) и в пределах (0-98)% на участке (1,6 с.ш., 112 з.д. – 46 с.ш., 124 з.д.).

Ионы атомарного водорода также наблюдались в обоих полушариях. В восточном – над территорией Китая и Индии на участке (32° с.ш., 89° в.д. – 2° ю.ш., 80° в.д.) наблюдалось изменение содержания ионов водорода в пределах (0-37)% по отношению к атомарному кислороду. А в западном полушарии в распределении ионов водорода выявилась интересная особенность. Эти ионы

наблюдались на участке (35° ю.ш., 104° з.д. – 44° с.ш., 124° з.д.) и их концентрация на большей части орбитального участка не превышала 25 %, а на участке (0° с.ш., 112° з.д. – 10° с.ш., 115° з.д.) протяжённостью около 1100 км наблюдалось резкое, до (200-305)% по отношению к концентрации ионов атомарного кислорода, локальное увеличение концентрации ионов атомарного водорода, которое на границе также резко уменьшилось (рис. 1). Эта локальная аномалия, по всей вероятности, имеет сейсмическое происхождение.

Несмотря на то, что в течение 11-го марта и несколько суток позже последовала целая серия (свыше 40) мощных афтершоков с магнитудами более 6, ситуация с легкими ионами в районе над Тихим океаном оставалась подобной вышеописанной.

Такая умеренно возмущённая ситуация над Тихим океаном (когда при наличии лёгких ионов основной атмосферный ион – атомарный кислород сохранял своё доминирование в

верхней ионосфере) продолжалась до 24-го августа 2011 г. (рис. 3). Однако уже из этого рисунка видно, что в районе Гималаев, Индийского и Тихого океанов резко выросло в верхней ионосфере содержание лёгких газов. После мощного землетрясения (с $M = 6,1$), которое произошло 22.08.2011 г. в Индонезии ($6,3^\circ$ ю.ш., 104° в.д.) ситуация в верхней ионосфере резко изменилась. Так, 24.08.2011 г. вдоль орбиты КА в восточном полушарии на участке ($51,0^\circ$ с.ш., 93° в.д. – $55,0^\circ$ ю.ш., 62° в.д.) содержание ионов гелия менялось в пределах (6-52)% от содержания ионов атомарного кислорода. А в западном полушарии на этой орбите наблюдались более заметные концентрации ионов гелия – на участке (70° ю.ш., 48° в.д. – 18° ю.ш., 110° з.д.) превышения местами достигали значений в 8,4 раз больше концентраций ионов кислорода. На участке ($9,6^\circ$ с.ш., 116° з.д. – 40° с.ш., 124° з.д.) также сохранялись (до 40%) высокие концентрации ионов гелия.

Наиболее драматическая ситуация произошла с ионами атомарного водорода на этой орбите. В восточном полушарии на участке орбиты ($33,0^\circ$ с.ш., 87° в.д. – 23° ю.ш., 74° в.д.) наблюдались ионы атомарного водорода в пределах (0-60)% от концентрации ионов атомарного кислорода. А на протяжённом участке от Антарктиды до средних северных широт Тихого океана (78° ю.ш., 63° з.д. – 42° с.ш., 125° з.д.) ионы водорода значительно доминировали в ионосфере, когда на некоторых отрезках превышение достигало 50 и более раз, что свидетельствует о возрастании сейсмической активности в соответствующих зонах Тихого океана.

На следующий день, 25-го августа (рис. 4), произошло резкое усиление в глобальном масштабе содержания лёгких ионов в верхней ионосфере. А накануне сильное землетрясение с $M = 7$ произошло в Перу ($7,6^\circ$ ю.ш., $75,5^\circ$ з.д.). В восточном полушарии на участке орбиты КА ($81,2^\circ$ с.ш., 180° в.д. – $43,0^\circ$ ю.ш., $73,0^\circ$ в.д.) наблюдалось увеличение ионов гелия в пределах (8-32)%, а ионы атомарного водорода наблюдались в пределах широт от $33,0^\circ$ с.ш. до $37,0^\circ$ ю.ш. в интервале (5-38)% от содержания ионов атомарного кислорода.

А в западном полушарии на этой орбите наблюдалась ещё более возмущённая ситуация. Ионы гелия имели более высокие концентрации практически на всей оставшейся части орбиты (76° ю.ш., 66° з.д. – 81° с.ш., 153° в.д.) с превышением до 15 раз, а на участке

орбиты протяжённостью около 1700 км в пределах южных широт от 50 до 35 градусов – полностью отсутствовали ионы атомарного кислорода.

Ионы атомарного водорода также доминировали на значительной части орбиты в западном полушарии ($73,0^\circ$ ю.ш., 73° з.д. – $45,0^\circ$ с.ш., $121,0^\circ$ з.д.), имея превышение до 10-15 раз над ионами атомарного кислорода. При этом доминирующим ионом был атомарный водород, концентрация которого даже в 2 раза превышала содержание ионов гелия.

При этом землетрясении в атмосферу, видимо, было выброшено такое количество газов, что сильное возмущение с доминированием лёгких ионов в глобальном масштабе сохранялось длительное время. За это время в районе Тихого океана были сильные землетрясения: 09.09.2011 г. с $M=6,4$ в районе западного побережья США ($49,5^\circ$ с.ш., $126,9^\circ$ з.д.), 15.09.2011 г. в Тихом океане вблизи Новозеландии ($35,6^\circ$ ю.ш., 179° в.д.) и 15.09.2011 г. в Тихом океане вблизи о. Фиджи ($21,6^\circ$ ю.ш., 179° з.д.). По нашим данным возмущение верхней ионосферы в глобальном масштабе продолжалось почти месяц, с 24.08.2011 г. по 20.09.2011 г.

Как видно из рис.5, 20-го сентября 2011 года верхняя ионосфера в глобальном масштабе уже была относительно спокойной. В восточном полушарии лёгкие ионы наблюдались на одном участке орбиты (27° с.ш., 102° в.д. – 5° ю.ш., 95° в.д.) в небольших относительных концентрациях: (0-21)% – для гелия и (0-6)% – для атомарного водорода.

Иная ситуация в западном полушарии. Здесь ионы гелия наблюдаются на двух участках орбиты: (68° ю.ш., 70° з.д. – 27° ю.ш., 90° з.д.) и (7° с.ш., 98° з.д. – 39° с.ш., 107° з.д.). Их концентрация значительно больше и меняется в пределах (0-120)% по отношению к атомарному кислороду на обоих участках.

Ионы атомарного водорода здесь наблюдаются практически также на тех же двух участках: (65° ю.ш., 72° з.д. – 3° ю.ш., 96° з.д.) и ($9,6^\circ$ с.ш., 99° з.д. – 34° с.ш., 105° з.д.) А содержание этих ионов значительно велико и меняется до 3,8 раз для первого и до 2,7 раз – для второго участка.

Похожая на рис.4 картина резкого возрастания содержания лёгких ионов наблюдалась в ионосфере уже после 20.10.2011г. (рис. 6) и сохранялась 23 дня, вплоть до 12.11.2011 г. А 23.10.2011 г. в Турции ($38,7^\circ$ с.ш., $43,5^\circ$ в.д.) произошло сильное землетрясение с магнитудой 7,1.

Особенностью этого возмущения верхней ионосферы в том, что оно проявилось ещё за трое суток до событий в Турции. Возможно, что в некоторых случаях **выбросы газов** **предваряют процессы интенсивных сдвигов**

земной коры и их регистрация различными мониторами, в том числе находящихся на космических орбитах, как в нашем случае, могут служить основой для разработки методик прогноза этих событий.

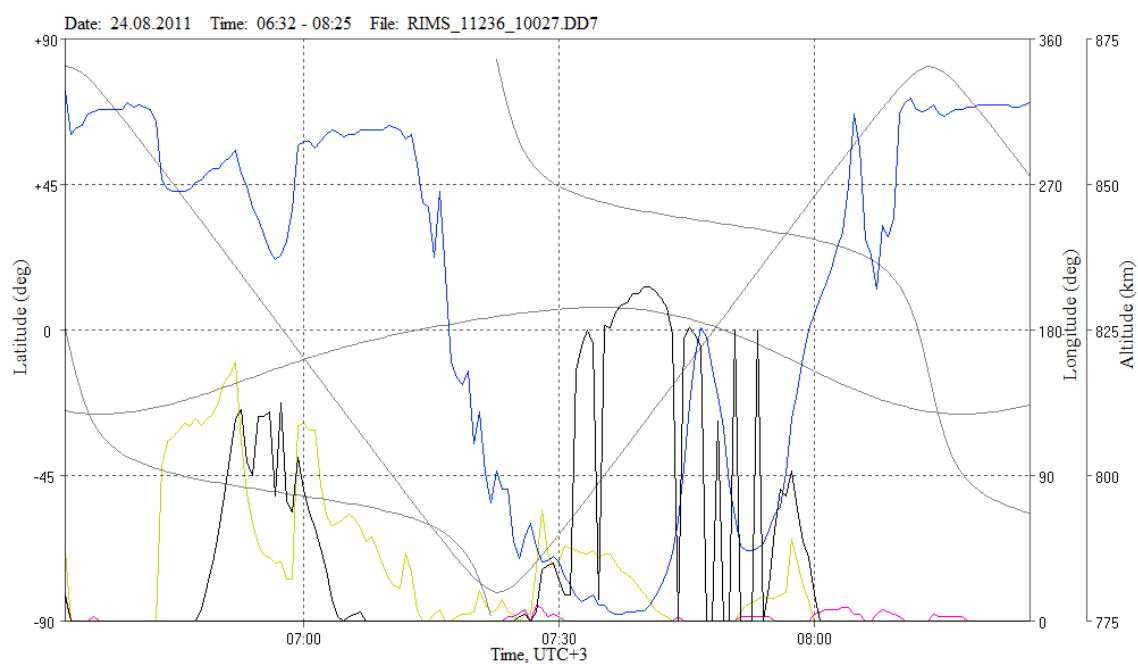
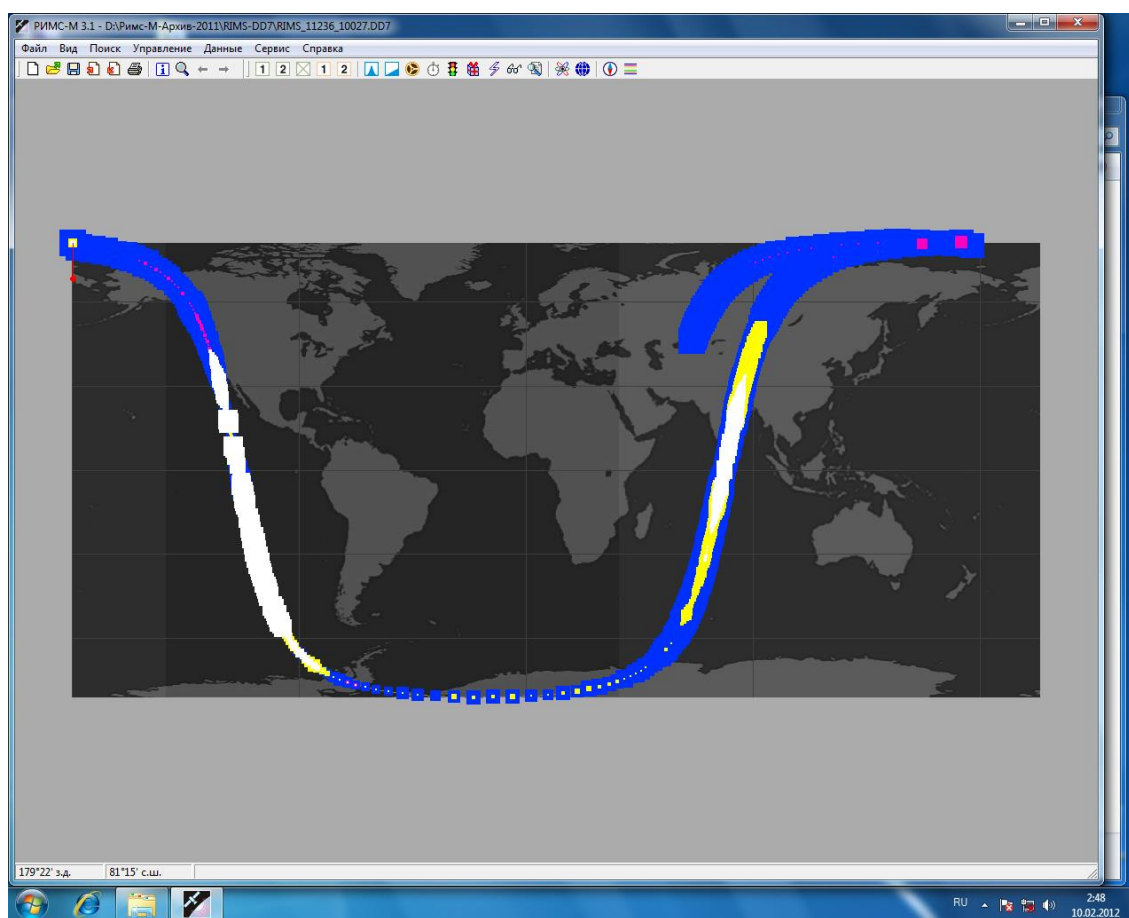


Рис.3. Карта и график распределения ионов вдоль орбиты 24.08.2011г (Римс-11236-027).

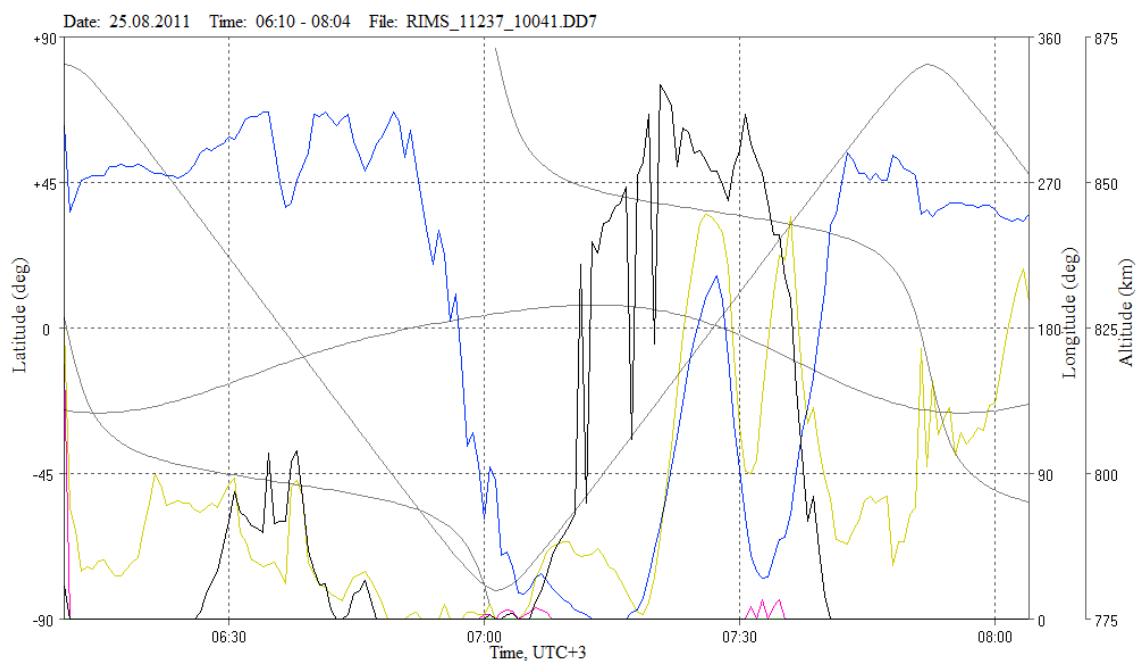
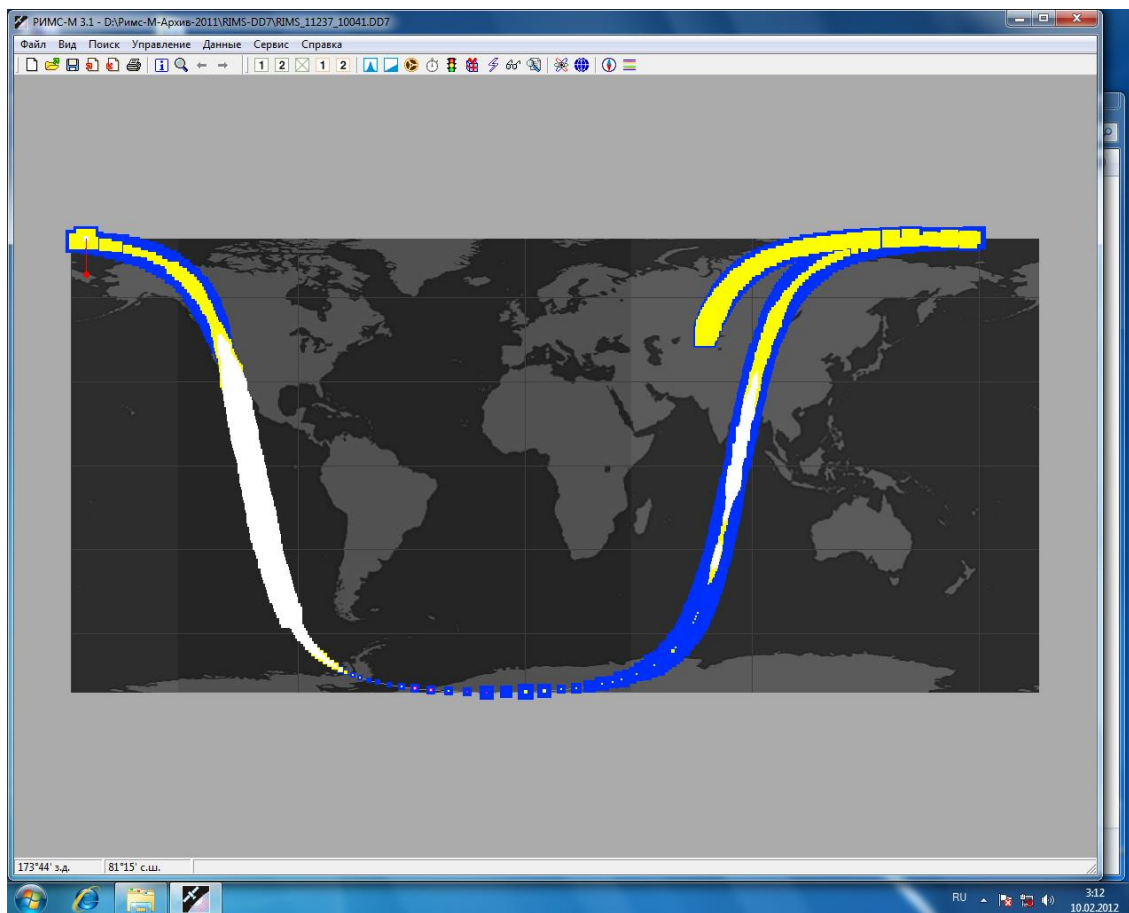


Рис.4. Карта и график распределения ионов вдоль орбиты КА Метеор-3М 25.08.11Г (Римс-11237-941). Цвета ионов: O^+ – синий, He^+ – жёлтый, H^+ – белый – на карте, чёрный – на графике.

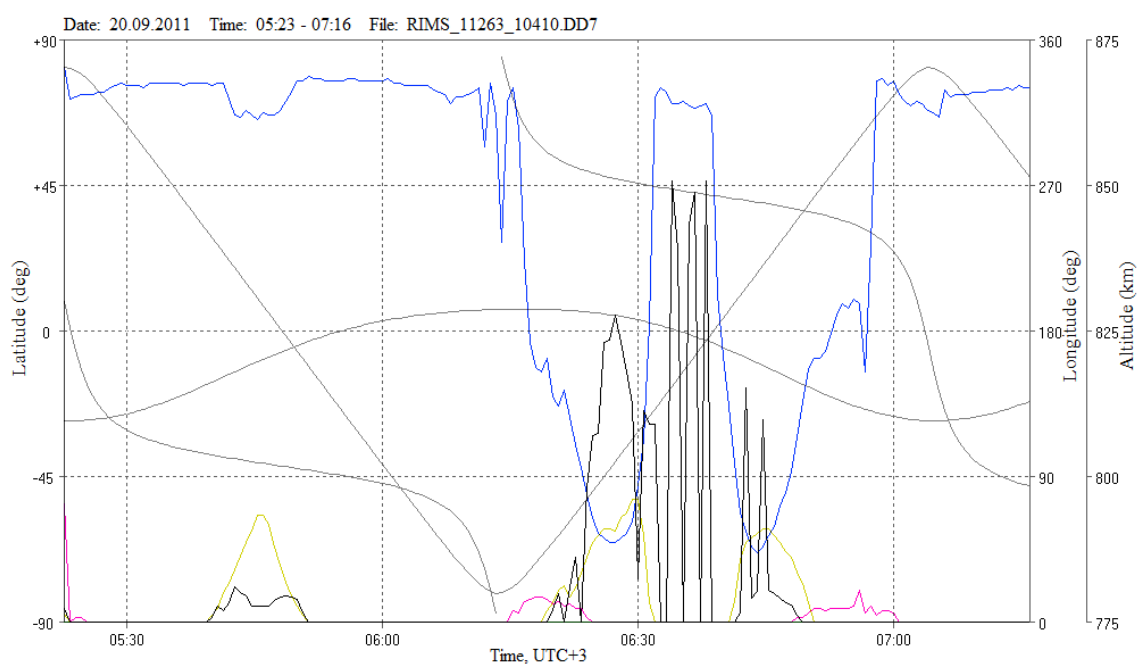
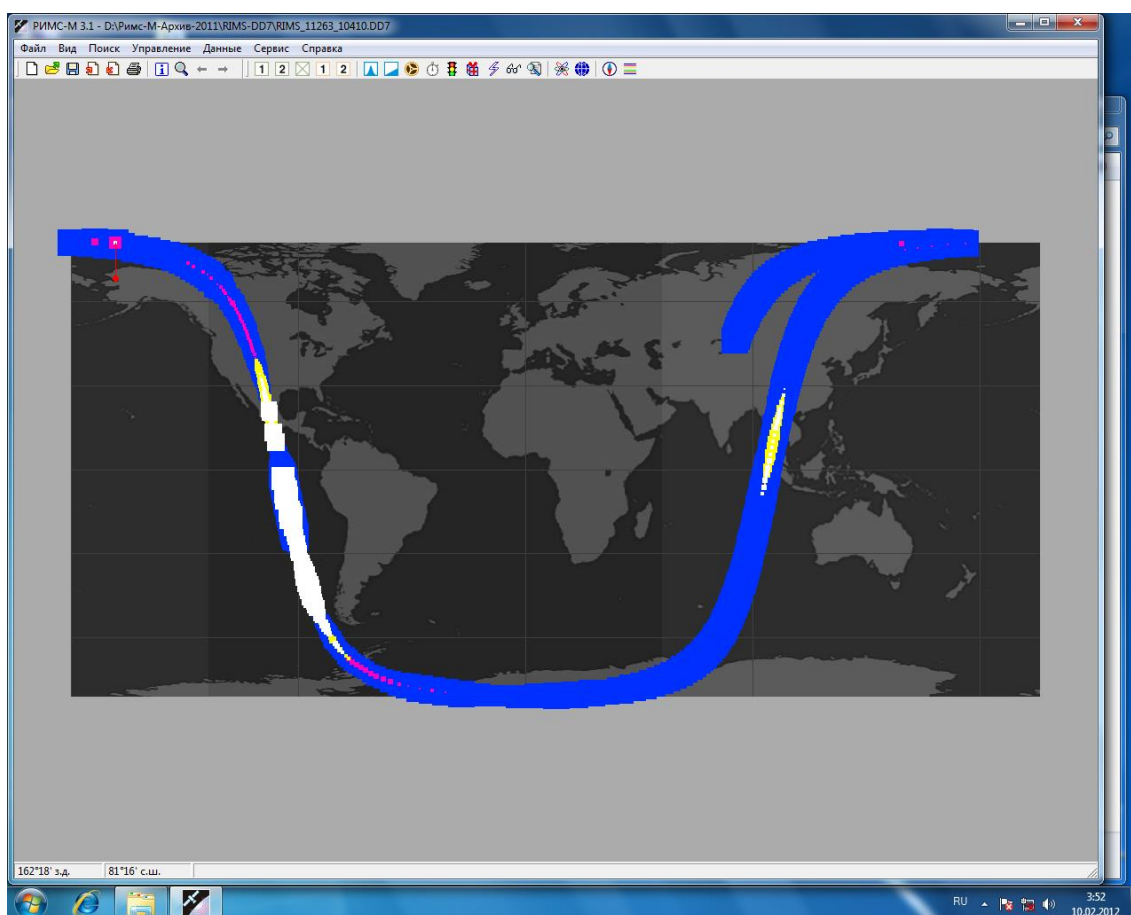


Рис.5. Карта и график распределения ионов вдоль орбиты КА Метеор-3М 20.09.11г (Римс-11263-410). Цвета ионов: O^+ – синий, He^+ – жёлтый, H^+ – белый – на карте, чёрный – на графике.

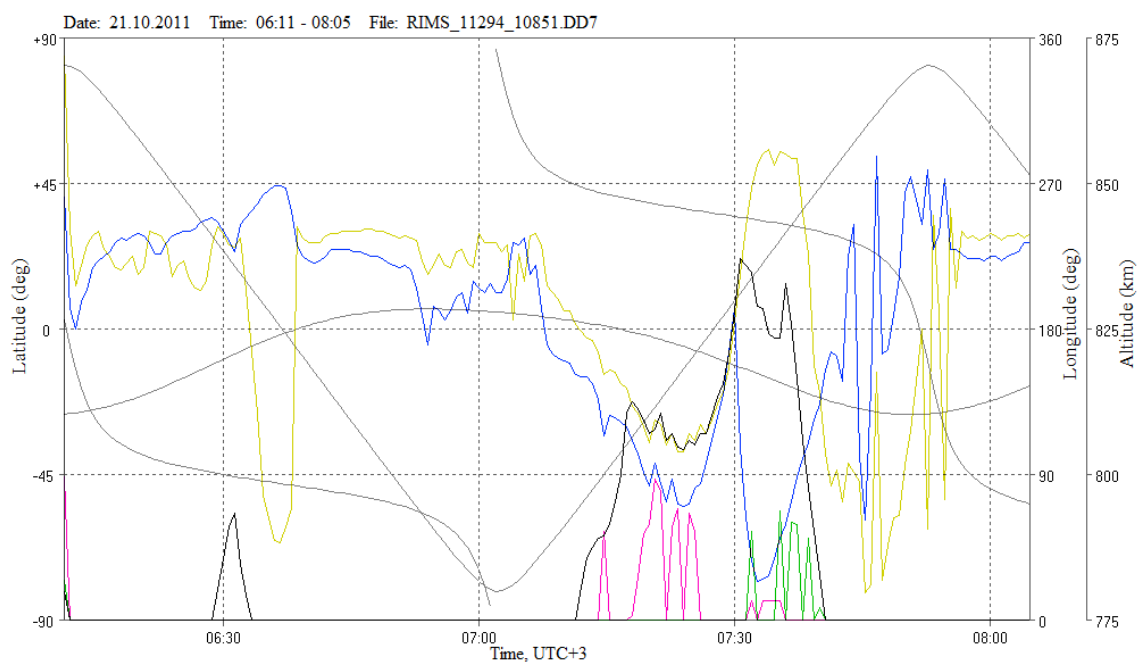
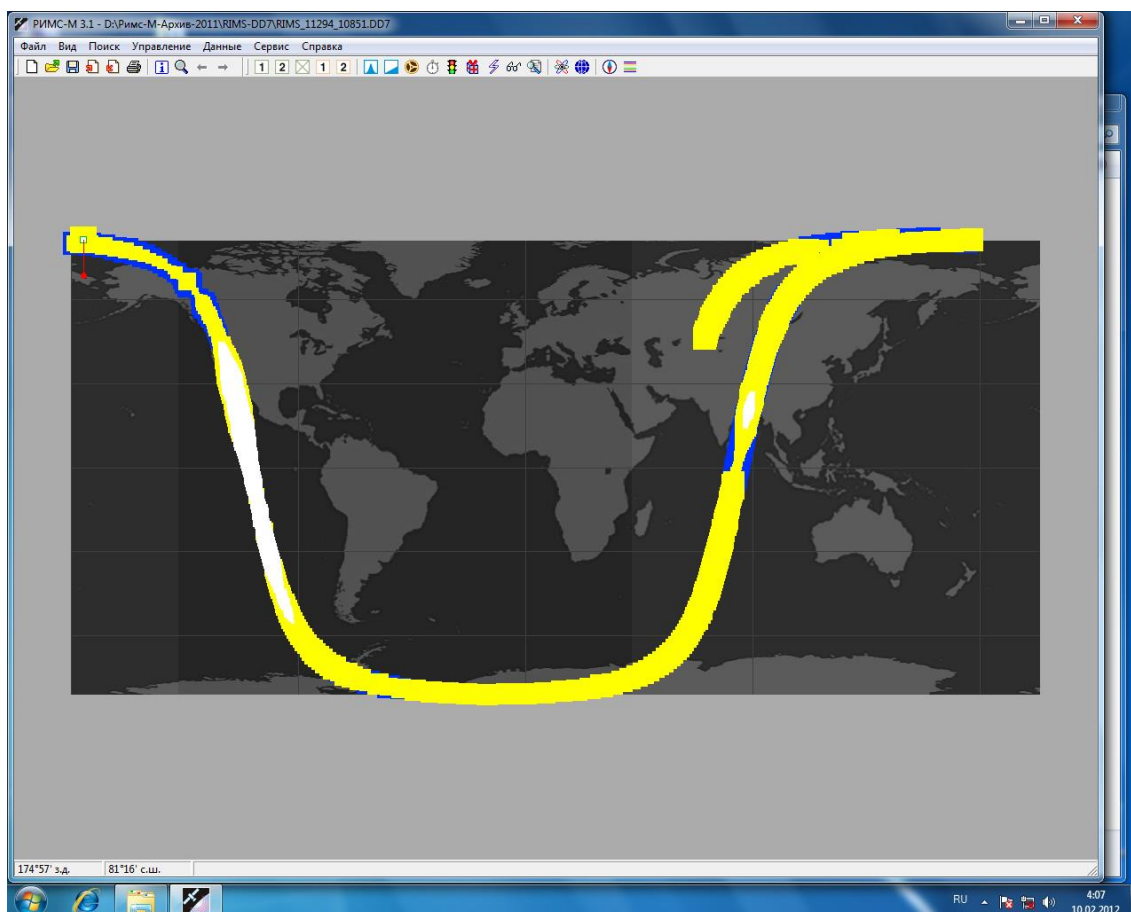


Рис.6. Карта и график распределения ионов вдоль орбиты КА Метеор-3М. Цвета ионов: O^+ – синий, N^+ – малиновый, He^+ – жёлтый, H_2^+ – зелёный, H^+ – белый – на карте, чёрный – на графике.

После этого были сильные (с магнитудой более 6) землетрясения 27.10.2011 г. в Тихом океане вблизи о. Фиджи (17,9° ю.ш., 179,4° з.д.) и в Перу 28.10.2011 г. (14,5° ю.ш., 76° з.д.), также коррелирующие с резким увеличением концентраций орбитальных лёгких ионов в рассматриваемый период времени, вплоть до 12.11.2011 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение делаем основной вывод: радиочастотный масс-спектрометр РИМС-М, установленный на КА Метеор-3М и регулярно (ежедневно) над фиксированными районами Земли регистрирующий лёгкие ионы, в дополнение к своим основным функциям – мониторинга ионного состава верхней ионосферы, – также попутно может служить и

монитором для диагностики сейсмической активности планеты с возможностью получения информации, которая может быть использована в разработке методов прогноза сильных землетрясений.

Соотношение между концентрациями ионов легких газов и ионом атомарного кислорода – основного атмосферного иона – можно рассматривать ориентировочно в качестве параметра, характеризующего интенсивность сейсмических процессов в Земле. Иногда ионы водорода и гелия на некоторых участках орбиты превышали по содержанию или полностью замещали ионы атомарного кислорода. Если исследовать это соотношение по времени (на разных орбитах), то характер его временной изменчивости может быть использован в прогностических целях.

INVESTIGATION OF SEISMIC ACTIVITY ON THE CHEMICAL COMPOSITION OF THE UPPER IONOSPHERE

The results of the measurement and analysis of changes in the ionic composition of the upper atmosphere of the Earth at an altitude of about 820 km, obtained by means of radio-frequency mass spectrometer RIMS-M on board the spacecraft Meteor-3M, depending on the seismic activity of the planet. Revealed a nearly constant presence of abnormally high relative concentrations of light ions – hydrogen and helium – over the locality areas of high seismic activity. Was a sharp increase in the concentration of light ions before and during prolonged (more than two weeks) time after the devastating earthquake with a magnitude of more than 6. We discuss the causal relationship of these events.

KEY WORDS: SEISMIC ACTIVITY, SATELLITE, IONOSPHERE.

ЛИТЕРАТУРА

1. Д.Г.Осика, А.М.Магомедов, М.Н.Смирнова, Р.А.Левкович, А.Б.Мегаев. Гидродинамические и геохимические предвестники сильных землетрясений Северного Кавказа. Сборник статей-докладов «Поиски предвестников землетрясений» на Ташкентском Международном симпозиуме 27 мая – 3 июня 1974 года. Издательство «ФАН» Узбекской ССР, Ташкент, 1976 г.
2. Pulinets S.A., Gaivoronska T.B., Leyva Contreras A., Ciraolo L., Correlation analysis technique revealing ionospheric precursors of earthquakes, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 4, pp. 697-702, 2004.
3. Pulinets S.A., Kotsarenko A.N., Ciraolo L., Pulinets I.A., Special case of ionospheric day-to-day variability associated with earthquake preparation, *Adv.Space Res.*, 39 (5), pp. 970-977, 2007.