

УДК 550.510.535

О СВЯЗИ СЕЙСМИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ С ИОННЫМ СОСТАВОМ ВЕРХНЕЙ ИОНОСФЕРЫ

Похунков А. А., Тулинов Г. Ф., Хотенко Е. Н., Похунков С. А., Рыбин В. В.,
Беликов Ю. Е.

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Институт прикладной геофизики имени академика Е. К. Федорова», Росгидромета, г. Москва, Россия, 129128, г. Москва, ул. Ростокинская, 9, e-mail: madam.ermolova@gmail.com

Приведён краткий обзор исследований влияния сейсмической активности Земли на состояние верхней атмосферы и ионосферы над подстилающей поверхностью планеты. Представлены результаты измерений и анализ 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 сейсмоактивные периоды времени. Выявляется практически постоянное присутствие аномально высоких относительных концентраций лёгких ионов – водорода и гелия над районами высокой сейсмической активности и над их ближайшими окрестностями. Отмечено резкое увеличение концентраций лёгких ионов накануне и в течение длительного (иногда более двух недель) времени после разрушительных землетрясений с магнитудой более 6. Обсуждается причинная связь этих событий.

Ключевые слова: верхняя ионосфера, ионный состав, легкие ионы, радиочастотный масс-спектрометр, сейсмоактивность.

ON THE RELATIONSHIP BETWEEN SEISMIC ACTIVITY AND IONIC COMPOSITION OF THE UPPER IONOSPHERE

Pohunkov A. A., Tulinov G. F., Khotenko E. N., Pohunkov S. A., Pybin V. V., Belikov Y. E.

Federal State Budgetary Institution "Fedorov Institute of Applied Geophysics"

A brief review of research on the influence of the Earth's seismic activity on the state of upper atmosphere and ionosphere above the underlying surface of the planet is presented. The results of measurements and analysis of changes in ionic composition of the Earth's upper atmosphere at altitudes of about 820 km, obtained by radio-frequency mass spectrometer RIMS-M onboard Meteor-3M in a seismically active periods are presented. Almost constant presence of abnormally high relative concentrations of light ions - hydrogen and helium over the areas of high seismic activity and over their immediate surroundings is being detected. A sharp increase in the concentration of light ions before and during prolonged (sometimes more than two weeks) time after the destructive earthquakes with a 6-magnitude and more. The causal relationship of these events is noted.

Key words: upper atmosphere, ionic composition, light ions, radio-frequency mass spectrometer, seismic activity.

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 ежедневные измерения на двух активных витках, разделённых интервалом около 12 часов.

В настоящее время известно, что 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 (H₂, He, CH₄ и др.). При этом содержание H₂ было на 5–6 порядков, а He и CH₄ – 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 [4,5], где исследовалось уменьшение среднего молекулярного веса ионов атмосферы под влиянием сейсмической активности.

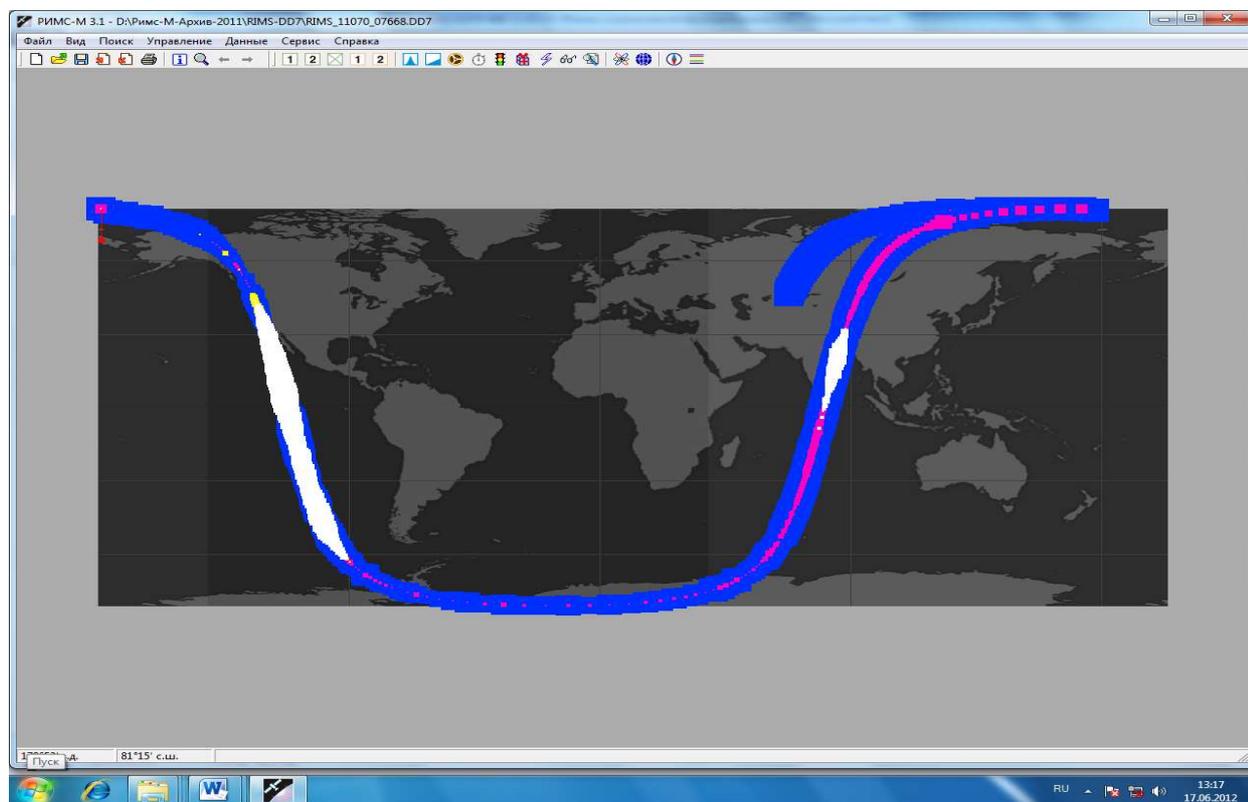
Вообще, спутниковый мониторинг давно и успешно используется для анализа связи сейсмической активности и состояния ионосферы. Так, с помощью навигационных систем Глонасс и GPS исследовано методом радиопросвечивания поведение максимума электронной концентрации вдоль траектории нижележащей ионосферной точки в период сильнейшего землетрясения в Турции 17 августа 1999 года. Отмечалось общее увеличение значения этого параметра за 2–3 суток и последующее достижение минимума за сутки до начала землетрясения над эпицентральной областью [2]. Другое интересное явление – образование сильно вытянутых в меридиональном направлении перемещающихся ионосферных возмущений, – исследовано в работе [3], где отмечалось проявление подобной модификации ионосферы даже при слабых землетрясениях с магнитудой до 5 баллов по шкале Рихтера.

Анализ распределения ионов

Анализ распределения ионов газов по орбитам показывает, что лёгкие ионы появляются над районами планеты с высокой сейсмической активностью. По данным нашего анализа, сейсмоактивные районы 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.

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, в сопровождении сильного цунами, в верхней ионосфере произошли локальные изменения (в районе Тихого океана) в составе лёгких ионов. Для наглядной иллюстрации распределение ионов вдоль орбиты для 11-го марта показано на рис. 1, где траектория орбиты КА Метеор-3М нанесена на карту Земли, а концентрации измеренных ионов нанесены на траекторию в каждой точке в виде цветных квадратов, площади которых пропорциональны концентрациям (белый квадрат – атомарный

водород, зелёный – молекулярный водород, жёлтый – гелий, малиновый – атомарный азот, синий – атомарный кислород).



1

Рис.1. Орбита КА Метеор-3М на карте Земли 11.03.2011 г. -06.23 – 08.17 МСК, (RIMS-11070-07668)

Из этого рисунка видно, что 11-го марта основным ионом в глобальном масштабе в верхней ионосфере оставался ион атомарного кислорода. В верхней ионосфере вдоль орбиты КА Метеор-3М в этот день в восточном полушарии на участке (31,0 гр.с.ш, 88,3 гр.в.д. - 19,2 гр.с.ш., 85 гр.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: ионы 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) % от атомарного кислорода. 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) % от концентраций ионов атомарного кислорода локальное увеличение ионов

атомарного водорода, которое на границе резко нивелировалось (рис.1). Эта локальная аномалия, вероятно, может иметь 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. 2). Однако уже из этого рисунка

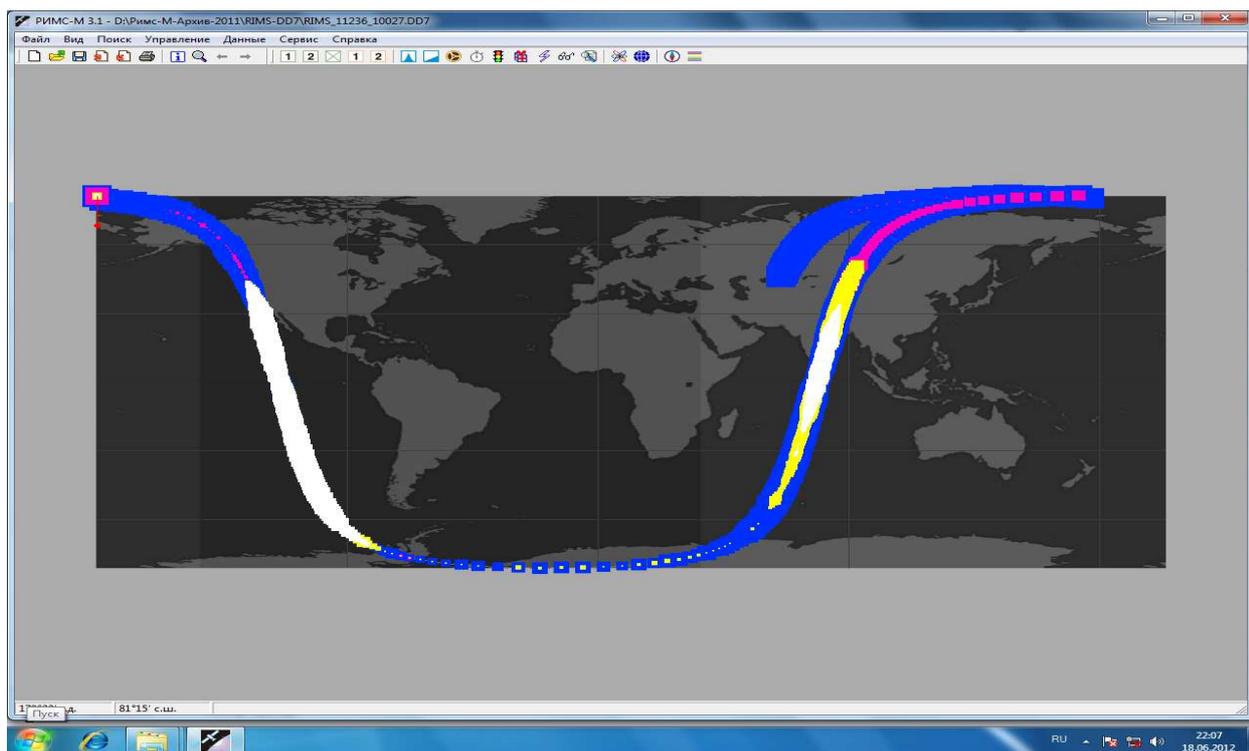


Рис. 2. Орбита КА Метеор-3М на карте Земли 24.08.2011 г.06.32 – 08.25 МСК, (RIMS-11236-10027)

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 ($6,3^0$ ю.ш., 104^0 в.д.), ситуация в верхней ионосфере резко изменилась. Так, 24.08.2011 г. вдоль орбиты КА в восточном полушарии на участке ($51,0^0$ с.ш., 93^0 в.д. - $55,0^0$ ю.ш., 62^0 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 (70^0 ю.ш., 48^0 в.д. – 18^0 ю.ш., 110^0 з.д.) превышения местами достигали значений в 8,4 раз больше концентраций ионов кислорода. На участке ($9,6^0$ с.ш., 116^0 з.д. - 40^0 с.ш., 124^0 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° 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. 3) произошло резкое усиление в глобальном масштабе содержания лёгких ионов в верхней ионосфере. А накануне сильное землетрясение с $M=7$ произошло в Перу (7,6° ю.ш., 75,5° з.д.).

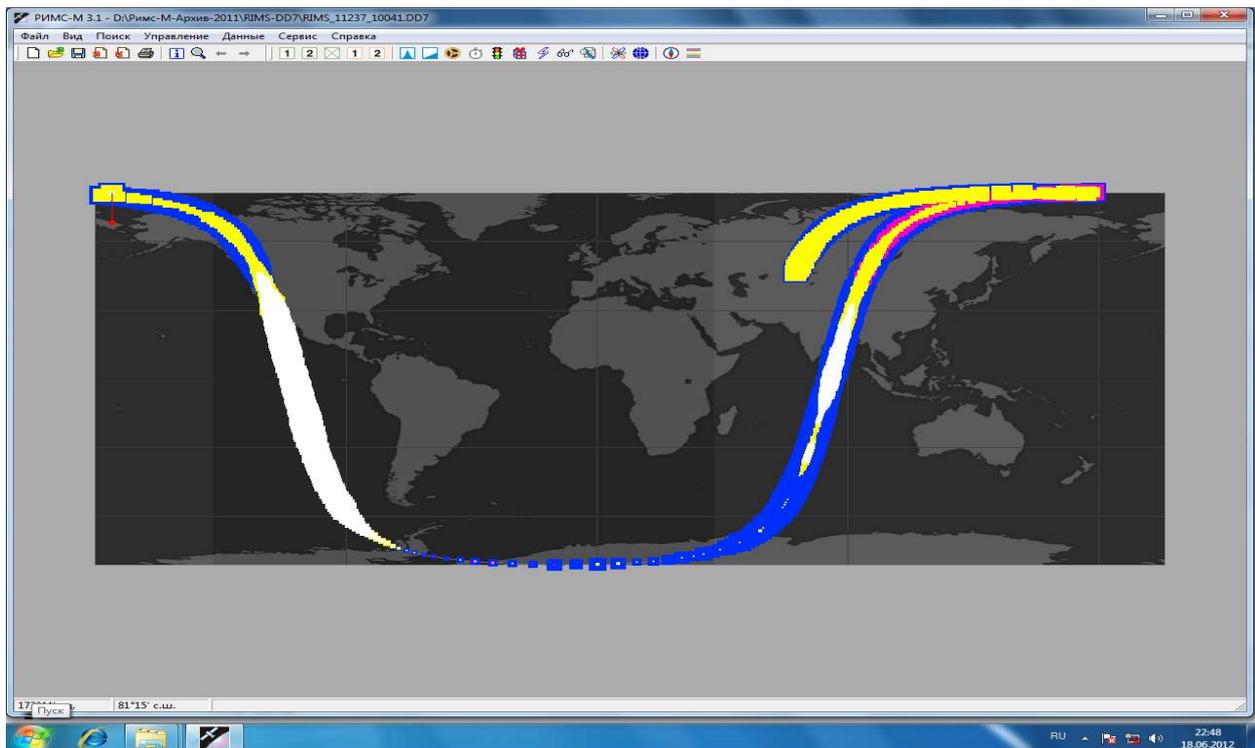


Рис. 3. Орбита КА Метеор-3М на карте Земли 25.08.2011 г. 06.10 – 08.04 МСК, (RIMS-11237-10041)

В восточном полушарии на участке орбиты КА (81,2° с.ш., 180° в.д. – 43,0° ю.ш., 73,0° в.д.) наблюдалось увеличение ионов гелия в пределах 8–32 %, а ионы атомарного водорода наблюдались в пределах широт от 33,0 с.ш. до 37,0 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° ю.ш., 73° з.д. – 45,0° с.ш., 121,0° 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 ($49,5^0$ с.ш., $126,9^0$ з.д.), 15.09.2011 г. в Тихом океане вблизи Новозеландии ($35,6^0$ ю.ш., 179^0 в.д.) и 15.09.2011 г. в Тихом океане вблизи о. Фиджи ($21,6^0$ ю.ш., 179^0 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 далее (рис. 4), 20-го сентября 2011 года верхняя ионосфера в глобальном

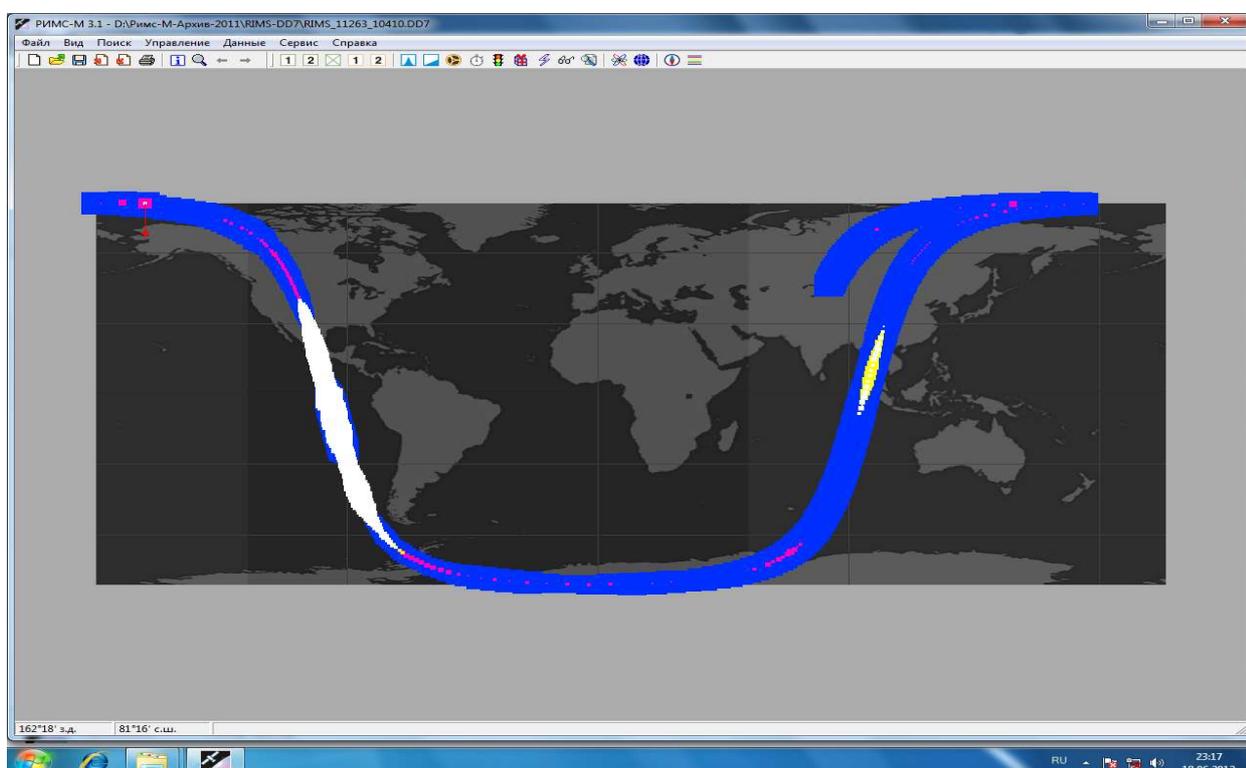


Рис. 4. Орбита КА Метеор-3М на карте Земли 20.09.2011 г. 05.23 – 07.16 МСК, (RIMS-11263-10410)

масштабе уже была относительно спокойной. В восточном полушарии лёгкие ионы наблюдались на одном участке орбиты (27^0 с.ш., 102^0 в.д. – 5^0 ю.ш., 95^0 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: (68^0 ю.ш., 70^0 з.д. – 27^0 ю.ш., 90^0 з.д.) и (7^0 с.ш., 98^0 з.д. – 39^0 с.ш., 107^0 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: (65^0 ю.ш., 72^0 з.д. – 3^0 ю.ш., 96^0 з.д.) и ($9,6^0$ с.ш., 99^0 з.д.– 34^0 с.ш., 105^0 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. 3 картина резкого возрастания содержания лёгких ионов наблюдалась в ионосфере уже после 20.10.2011 г. (рис.5) 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. Особенность 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 находящимися на космических орбитах, как в нашем случае, могут служить основой для разработки методик прогноза этих событий.

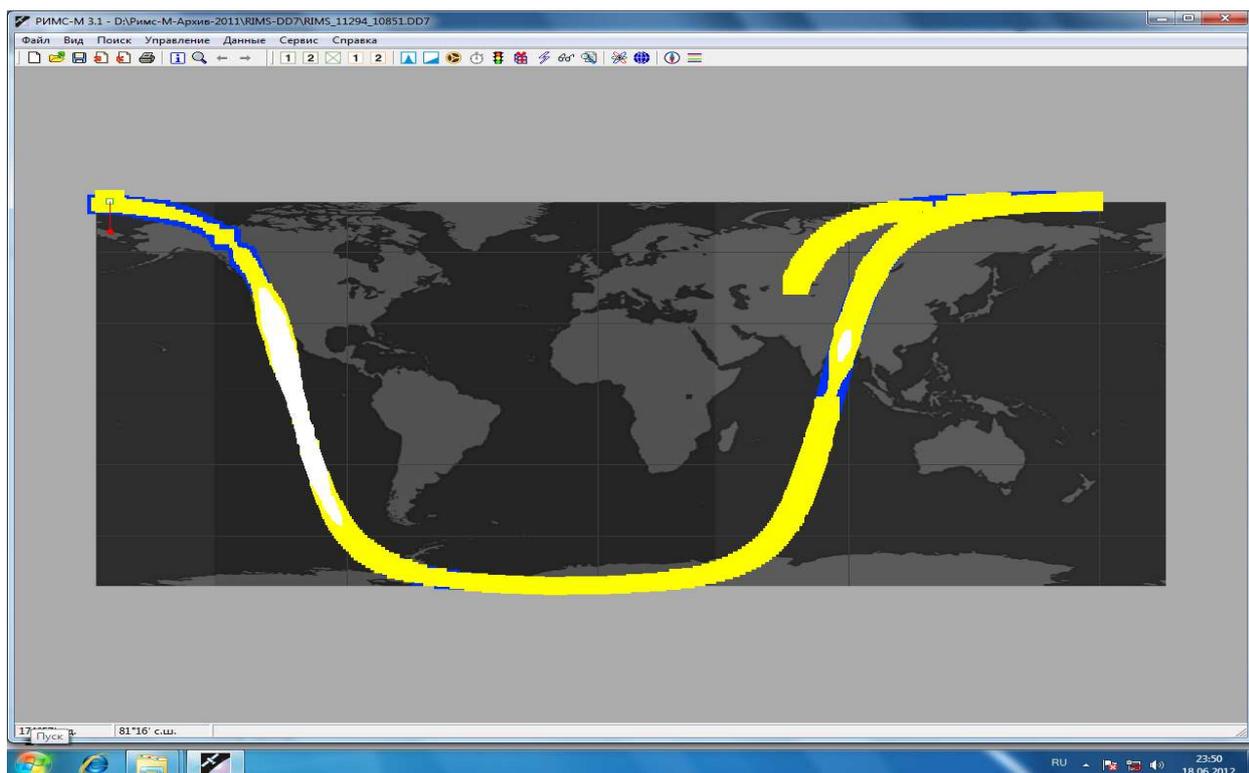


Рис. 5. Орбита КА Метеор-3М на карте Земли 21.10.2011 г. 06.11 – 08.05 МСК, (RIMS-11294-10851)

После этого были сильные (с магнитудой более 6) землетрясения 27.10.2011 г. в Тихом океане вблизи о. Фиджи ($17,9^{\circ}$ ю.ш., $179,4^{\circ}$ з.д.) и в Перу 28.10.2011 г. ($14,5^{\circ}$ ю.ш., 76° з.д.), также коррелирующие с условиями резкого увеличения количества лёгких ионов в рассматриваемый период времени, вплоть до 12.11.2011 г.

Заключение

Радиочастотный масс-спектрометр РИМС-М, установленный на КА Метеор-3М и регулярно (ежесуточно) над фиксированными районами Земли регистрирующий лёгкие ионы, в дополнение к своим основным функциям – мониторинга ионного состава верхней ионосферы – может служить монитором не только для диагностики сейсмической

активности, но 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 условно ориентировочно в качестве параметра, характеризующего интенсивность сейсмических процессов в Земле. Иногда концентрации ионов водорода и гелия на некоторых участках орбиты превышали или полностью замещали ионы атомарного кислорода. Если исследовать этот параметр по времени (на разных орбитах), то его временная изменчивость (динамика) может быть использована в прогностических целях как дополнительный фактор-предшественник сильных землетрясений и может быть использована в разработке методов прогноза сильных землетрясений.

Список литературы

1. Осика Д. Г., Магомедов А. М., Смирнова М. Н., Левкович Р. А., Мегаев А. Б. Гидродинамические и геохимические предвестники сильных землетрясений Северного Кавказа: Сборник статей-докладов «Поиски предвестников землетрясений» на Ташкентском Международном симпозиуме 27 мая – 3 июня 1974 года. Ташкент: Издательство «ФАН» Узбекской ССР, 1976.
2. Смирнов В. М. // Электронный журнал «Исследовано в России». 2001. №153. С.1759–1767.
3. Смирнов В. М. // Электронный журнал «Исследовано в России». 2003. №012. С.121-129.
4. 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.
5. 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.

Рецензенты:

Пулинец Сергей Александрович, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник ОАО «Корпорация ВНИИЭМ», г. Москва.

Тертышников Александр Васильевич, доктор технических наук, главный научный сотрудник ФГБУ «ИПГ», г. Москва.