

ВОЛНОВЫЕ ВОЗМУЩЕНИЯ В НИЖНЕЙ ПОЛЯРНОЙ ИОНОСФЕРЕ ВО ВРЕМЯ ПАДЕНИЯ ЧЕЛЯБИНСКОГО МЕТЕОРИТА

В.Д. Терещенко, Е.Б. Васильев, В.А. Терещенко, О.Ф. Оглоблина, С.М. Черняков

Полярный геофизический институт КНЦ РАН, Мурманск, Россия, 183010
e-mail: vladter@pgi.ru

Аннотация. Представлены результаты наблюдений полярной нижней ионосферы методом частичных отражений радиоволн после полёта и падения Челябинского метеорита 15 февраля 2013 г. Определена структура ионосферы и найдены параметры волновых возмущений в ионосфере предположительно от рассматриваемого события.

1. Введение

Поиску эффектов в ионосфере, вызванных различными источниками возмущений естественного и искусственного происхождения, посвящено большое количество работ [Митра, 1977; Госсард и Хук, 1978; Гохберг и Шалимов, 2008; Черногор, 2009]. В этих работах описаны, в основном, эффекты, наблюдаемые в среднеширотной ионосфере. Значительно меньше исследований проведено в полярной ионосфере, особенно в её D-области (50-90 км).

Удобным случаем выявления ионосферных возмущений, генерируемых при интенсивном воздействии на атмосферу Земли, явился полёт и взрыв Челябинского метеорита [Емельяненко и Шустов, 2013; Черногор 2013], который произошёл 15 февраля 2013 года в 03:20 UT. Космический объект, диаметром около 18 м и массой 11000 тонн, вошёл в атмосферу Земли со скоростью 18.3 км/с и, примерно, через 32.5 с на высоте 30-50 км разрушился в окрестностях Челябинска (54.8 N, 61.1 E). Общее количество высвободившейся энергии составило 440 килотонн в тротиловом эквиваленте. Движение и разрушение боида сопровождалось ярким свечением и мощными акустическими, инфразвуковыми и сейсмическими эффектами.

Целью работы является поиск волновых возмущений в нижней полярной ионосфере, сопутствующих полёту и взрыву Челябинского метеорита по данным средневолнового радиолокатора ПГИ, расположенного в п. Туманный Мурманской области (69.1 N, 35.7 E) на расстоянии 2060 км от Челябинска.

2. Результаты измерений и анализ

Наблюдения были проведены на установке ПГИ [Терещенко и др., 2003] с параметрами: рабочая частота – 2.5÷2.78 МГц; мощность передатчика в импульсе – около 60 кВт; длительность импульса – 15 мкс; частота зондирования – 2 Гц. Приём рассеянных сигналов осуществлялся приёмно-передающей антенной с шириной диаграммы направленности по уровню половинной мощности 19°×22°. Поочередно принимались две круговые поляризации, которые усиливались приёмником с полосой 40 кГц. Регистрация амплитуд сигналов проводилась в интервале высот 50-149 км, шаг снятия данных 0.5-1.5 км (рис. 1).

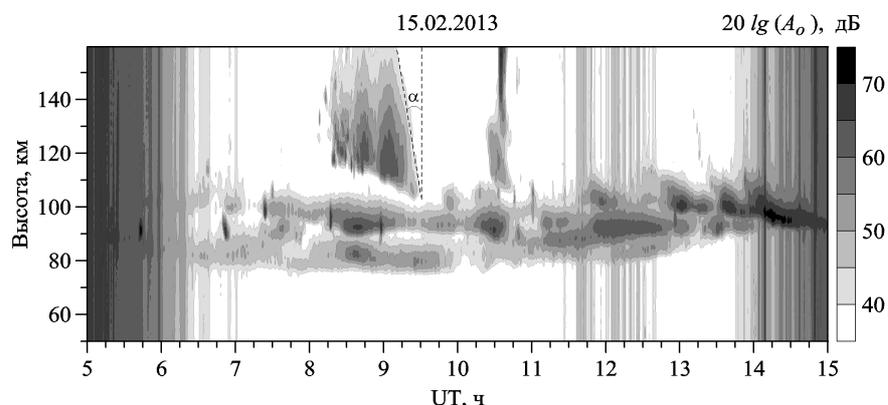


Рисунок 1. Амплитуда отражений обыкновенной волны на частоте 2.54 МГц

Амплитуда обыкновенной и необыкновенной компонент отражённого сигнала усреднялись за каждую минуту на всех регистрируемых высотах. По усреднённым данным амплитуд отражений радиоволн рассчитывался профиль электронной концентрации $Ne(h)$ методом дифференциального поглощения. Для выявления волновых возмущений высотно-временные зависимости амплитуд принятого сигнала

подвергались спектральному анализу с помощью оконного преобразования Фурье и вейвлет-преобразования. Кроме того, для анализа использовались данные сети ионозондов (<http://www.ngdc.gov/stp/OINO>), магнетометров и спутников GOES (<http://www.swpc.noaa.gov/>).

Результаты измерений (см. рис. 1) демонстрируют наличие возмущений в нижней ионосфере на высотах 70-150 км после взрыва Челябинского метеорита. Отражения проявляются как два отчётливых слоя на высотах 70-100 км, и как вертикально-слоистая структура на высотах 110-150 км. По данным спутника GOES в период наблюдений с 14 по 16 февраля вспышечная активность Солнца была слабой (класс В). Межпланетное магнитное поле, потоки протонов и электронов в конце 14, весь день 15 и в первой половине 16 февраля были типичными для спокойных условий.

Характерной особенностью зарегистрированных отражений является наклон волнового фронта ионосферных возмущений на угол между направлениями силы тяжести и магнитного поля в Туманном $\alpha = 11,4^\circ$. Такой наклон отражений в Е-области будет иметь место только при горизонтальном распространении волновых возмущений в северном направлении.

Спектральный анализ временных вариаций амплитуд отражений на высотах области Е в Туманном (рис. 2) показал наличие волновых возмущений длительностью около 60 мин и периодами 10-13 и 20-24 мин.

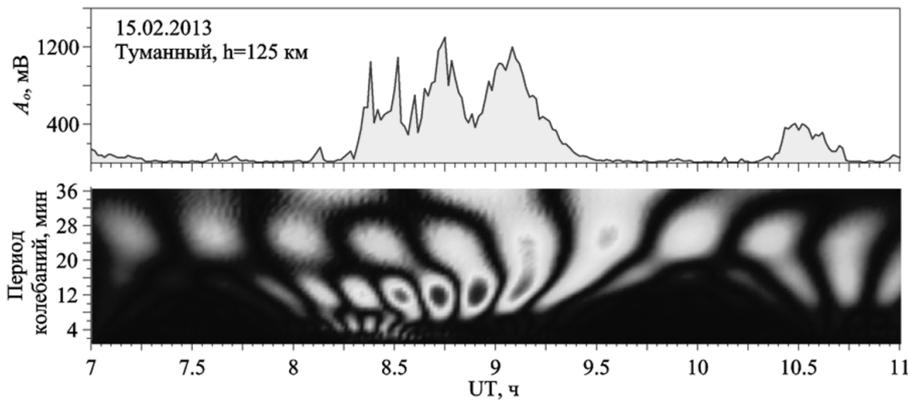


Рисунок 2. Временная зависимость амплитуды отражений в области Е и её вейвлет-спектр

Примерно такие же периоды были замечены во временных флуктуациях амплитуд радиошума и полного электронного содержания в нижней ионосфере во время падений Витимского (2002 г.) и Скандинавских (2004 г. и 2006 г.) болидов [Терещенко и др., 2007]. Наблюдаемые квазиволновые возмущения можно идентифицировать как сигналы от метеорита со скоростью распространения около 130-140 м/с.

Согласно Северному [1954] в нижней ионосфере могут возбуждаться и распространяться три ветви магнитогидродинамических (МГД) волн альвеновская (А), быстрая (Б) и медленная (М) волны. Для оценки фазовых скоростей волн $v_\phi = \omega/k$ (где $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число, λ – длина волны, ω – частота) и декрементов затухания (или инкрементов нарастания) колебаний $\gamma(\mathbf{k}) = \text{Im} \omega$ для сжимаемой проводящей слабонеизотермической атмосферы, находящейся в магнитном и гравитационном полях, получены следующие формулы:

$$v_{\phi A} = V_A \cos \vartheta, \quad \gamma_A = -k^2 v_m / 2, \quad v_{\phi B, M}^2 = \frac{1}{2} v_{ma}^2 \left(1 \pm \sqrt{1 - 4v_{mag}^2 / v_{ma}^2} \right),$$

$$\gamma_{B, M} = -\frac{k^2 v_m V_A^2 (v_\phi^2 - c_s^2 \cos^2 \vartheta)}{2 v_\phi^2 (2v_\phi^2 - c_s^2 - V_A^2)} - \frac{c_s^2}{2Hv_\phi} \frac{(v_\phi^2 \cos \varphi - V_A^2 \cos \vartheta \cos \eta)}{(2v_\phi^2 - c_s^2 - V_A^2)},$$

где v_m – магнитная вязкость, $v_{ma}^2 = c_s^2 + V_A^2$, $v_{mag}^2 = c_s^2 (N^2 \sin^2 \varphi / k^2 + V_A^2 \cos^2 \vartheta) / v_{ma}^2$, c_s и V_A – скорости звуковой и альвеновской волн, H – высота однородной атмосферы, φ – угол между \mathbf{k} и гравитационным ускорением \mathbf{g} , ϑ – угол между \mathbf{k} и геомагнитным полем \mathbf{B}_0 , η – угол между \mathbf{B}_0 и \mathbf{g} .

Из формул следует, что в направлении, перпендикулярном силе тяжести, гравитационное затухание отсутствует, и МГД волны могут распространяться в ионосфере на большие расстояния, вызывая в ней возмущения, особенно сильные и продолжительные в полярных областях.

Расчёты, сделанные по этим формулам для параметров среды на высотах 110-130 км, найденных с

помощью модели MSIS-E-90, дают следующие значения горизонтальной скорости: $v_{\text{фА}} = 80-125$ м/с, $v_{\text{фБ}} = 350-600$ м/с и $v_{\text{фМ}} = 100-160$ м/с. Первые цифры соответствуют значениям скорости на высоте 110 км. Если полагать, что возмущения от взрыва метеорита распространяются по ионосфере вдоль дуги большого круга, то скорость их движения будет 110 м/с. Причём, волны, идущие вдоль силы гравитации, затухают за несколько десятков секунд, а волны, идущие поперёк гравитации, - за несколько часов.

Удовлетворительное соответствие между скоростями медленных волн, найденных по формулам упрощенной линейной теории, и результатами измерений свидетельствует в пользу почти линейного отклика земной термосферы на внешнее воздействие.

Данные о поведении f_0F_2 на ионосферных станциях (рис. 3) демонстрируют необычный (отличный от контрольных дней) временной ход критической частоты F-области в 09 UT в Москве (55.5 N, 37.3 E) и в 10 UT в Ловозеро (67.97 N, 35.02 E). Продолжительность возмущений была от 3 до 8 ч.

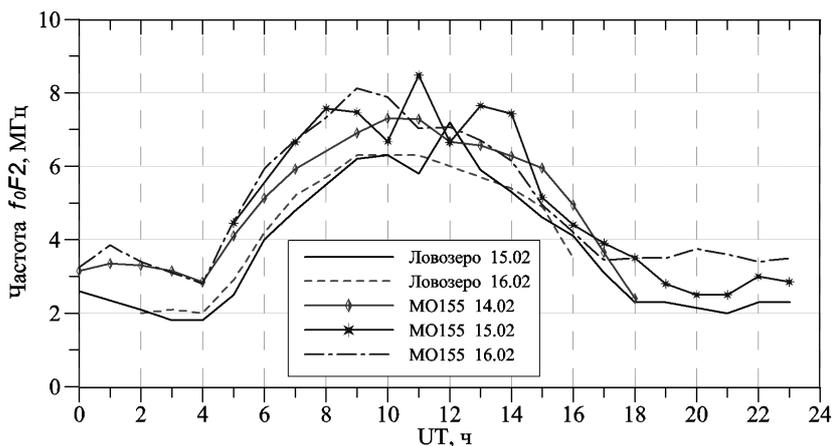


Рисунок 3. Суточные графики f_0F_2 , п. Ловозеро и Москва

Таким образом, после взрыва Челябинского метеорита возмущаются практически все области ионосферы.

Расчёт концентрации электронов по данным радиозондирования показал значительные изменения амплитуды флуктуаций плотности электронов на фиксированных высотах в D-области полярной ионосферы (рис. 4). Относительные возмущения концентрации электронов равнялись 50-90% и были в 3-4 раза меньше вблизи максимума области F2. При этом максимальная концентрация электронов на высоте 80 км достигала значений $(1.7-2.0) \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}$, а на высоте 90 км была на порядок выше. Расчётная горизонтальная скорость возмущения плотности электронов составила 100-180 м/с.

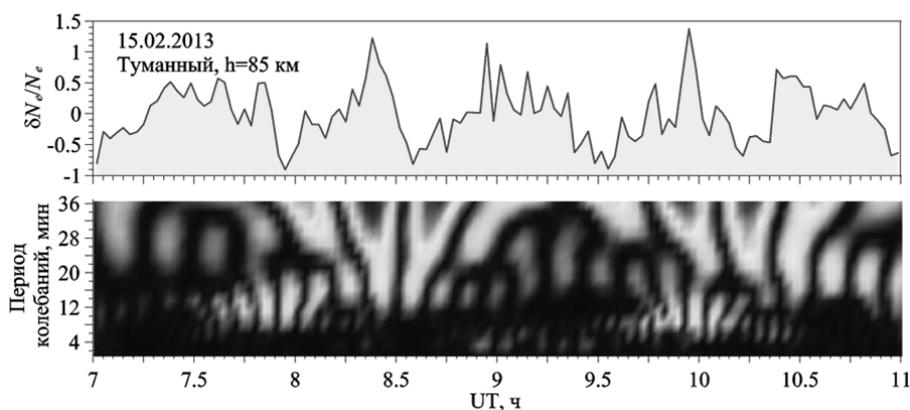


Рисунок 4. Флуктуация электронной концентрации в D-области полярной ионосферы и вейвлет-спектр

Ионосферные наблюдения в Тромсе (66.7 N, 19.0 E) позволили обнаружить вблизи максимума области F2 в интервале времени с 4:48 до 5:58 UT возмущения концентрации электронов, вызванные воздействием акустико-гравитационных волн с периодами 5-6 и 12-14 мин. Относительная амплитуда возмущений плотности электронов была равна 15-25%. Подобные флуктуации амплитуды радишума были зарегистрированы в Туманном в период с 4:18 до 5:15 UT (рис. 5). В предположении, что возмущения вызваны полётом и взрывом метеорита, скорости распространения акустических (звуковых и

инфразвуковых) волн будут равны 300-340 м/с, а гравитационных – 540-620 м/с.

На рис. 5 видно, что первое значительное возмущение амплитуды радишума произошло сразу после взрыва метеорита в 3:20 UT. Затем были ещё четыре всплеска амплитуды N-образной формы в 3:45, 4:18, 4:39 и 5:06 UT (стрелки на оси времени).

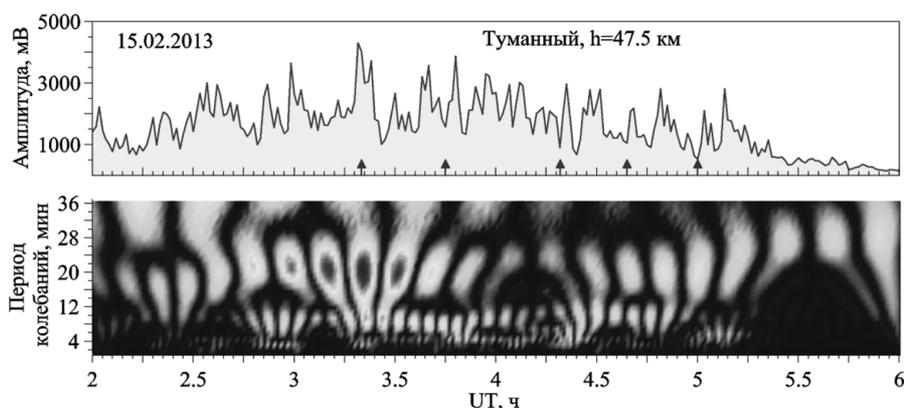


Рисунок 5. Временной ход амплитуды радишума и его вейвлет-спектр

Самому интенсивному сигналу соответствуют волновые возмущения с периодами 3-5, 7-10 и 20-25 мин. Такие периоды характерны для инфразвуковых и медленных МГД волн. Однако со скоростью света эти волны распространяться не могут. Объяснить их появление в месте приёма можно, если допустить, что помехи радиоприёму, создаваемые электромагнитными волнами, прошли через область атмосферы, возмущённую взрывом метеорита, и испытали на себе воздействие этого возмущения. Отметим, что всплески радиоизлучения в 3:20 UT зафиксированы также в Тромсе на частоте 2.64 МГц и на Шпицбургене (Свальбард) на частоте 5.6 МГц, что также свидетельствует в пользу сделанного предположения.

3. Выводы

По данным метода частичного отражения на расстоянии свыше 2000 км от эпицентра взрыва Челябинского метеорита в спокойных гелиогеофизических условиях обнаружены сильные изменения структуры и динамики областей D и E полярной ионосферы.

Определены форма, амплитуда, период и кажущаяся скорость перемещения ионосферных возмущений, которые, возможно, связаны с распространением атмосферных волн, генерируемых во время полёта и взрыва метеорита.

На основе анализа экспериментальных данных и геофизической обстановки выдвинута гипотеза о том, что воздействие взрыва на ионосферу может передаваться из средних широт в полярную область с помощью радиоволн средневолнового диапазона сторонних радиостанций, создающих помехи в точке приёма сигнала.

Список литературы

- Госсард Э., Хук У. Волны в атмосфере. – М.: Мир, 1978. – 532 с.
- Гохберг М.Б., Шалимов С.Л. Воздействие землетрясений и взрывов на ионосферу. – М.: Наука, 2008. – 295 с.
- Емельяненко, В.В., Шустов Б.М. Челябинское событие и астероидно-кометная опасность // УФН. – 2013. - Т.183, №8. – С. 885-888.
- Митра А. Воздействие солнечных вспышек на ионосферу Земли. – М.: Мир, 1977.–372с.
- Северный А.Б. О магнитогидродинамических явлениях у поверхности Солнца // Изв. Крымской астрофиз. обсерв. – 1954. – Т. 11. – С. 129-151.
- Терещенко В.Д., Васильев Е.Б., Овчинников Н.А., Попов А.А. Средневолновый радиолокатор Полярного геофизического института для исследования нижней ионосферы //Техника и методика геофизического эксперимента. – Апатиты: КНЦ РАН, 2003. – С. 37–46.
- Терещенко В.Д., Оглоблина О.Ф., Терещенко В.А., Черняков С.М., Васильев Е.Б. О возмущениях в полярной нижней ионосфере после падения крупных метеоритов // Труды XXV Всероссийского симпозиума по радиолокационному зондированию природных сред. Санкт-Петербург, 17-19 апреля 2007. – СПб: 4ЦНИИ МО РФ, 2009. – С. 579-585.
- Черногор Л.Ф. Радиофизические и геомагнитные эффекты стартов ракет. – Харьков: ХНУ, 2009. – 386 с.
- Черногор Л.Ф. Физические эффекты Челябинского метеороида в системе Земля – атмосфера – ионосфера – магнитосфера // I Украинская конф. радиофиз. исследования ионосферы. Тез. докл. Харьков, 24-25 октября 2013. – Харьков ХНУ, 2013 – С. 13-17.