

ИОНОСФЕРНЫЙ ЭФФЕКТ ЧЕЛЯБИНСКОГО СОБЫТИЯ

М.Ю. Кузьмичева, Т.В. Лосева, А.Н. Ляхов

В статье обсуждаются результаты регистрации возмущений в ионосфере Земли, наблюдавшихся после падения Челябинского метеорита 15 февраля 2013 года. Представлены результаты трехмерных газодинамических расчетов, позволяющие объяснить механизм формирования этих возмущений.

Введение

Процесс пролета через атмосферу Земли Челябинского метеорита 15 февраля 2013 г. вызвал целый ряд инструментально зафиксированных геофизических эффектов (сейсмических, акустических, оптических, ионосферных). В данной работе рассматривается влияние этого события на ионосферу. Спокойная геомагнитная обстановка 15.02.2013 ($K_p = 4$) позволяет, с большой степенью вероятности, исключить ионосферные бури аврорального генезиса. Возмущения в ионосфере Земли на высотах 100–700 км были зарегистрированы GPS станциями томографирования ионосферы, сетью ионозондов вертикального зондирования, с помощью радаров когерентного рассеяния системы SuperDARN. По опубликованным данным [Емельяненко и др., 2013] источник сейсмического сигнала соответствовал времени 03:20:33 UT в точке с координатами 54.8° с.ш., 61.1° в.д. Энергия взрыва по разным оценкам составила 300–500 кТ в тротиловом эквиваленте [Емельяненко и др., 2013]. По данным томографирования среднеширотной ионосферы [Гивишвили и др., 2013; Тертышников и др., 2013] возмущения электронной концентрации наблюдались в 06:39 UT на высотах 200–700 км в широтном диапазоне 51–57° с.ш. вдоль меридиана ~40° в.д. Интенсивные возмущения полного электронного содержания в 06:00–10:00 UT наблюдались на GPS-станциях в Нижнем Новгороде, Екатеринбурге, Новосибирске, Норильске, Иркутске, Алма-Ате [Бернгардт и др., 2013]. Суточные изменения критической плазменной частоты F2 слоя (f_oF_2) для станций вертикального зондирования ионосферы, расположенных в Екатеринбурге, Москве, Ростове-на-Дону, Санкт-Петербурге, анализировались в работе [Гивишвили и др., 2013]. По этим данным возмущения в ионосфере возникли 15 февраля и затронули практически всю область ионосферы от 100 до 250 км (слой F2). Все эти возмущения были синхронны и приходили в точку наблюдения в разное время. В работах [Кузьмичева, Лосева, 2013; Kuzmicheva, Losseva, 2013] приведены аналогичные картины возмущений f_oF_2 в Москве, Норильске, Якутске, Иркутске, а также их статистический анализ для Москвы. В работе [Гивишвили и др., 2013] отмечается отсутствие связи возмущений f_oF_2 в Норильске и Якутске с Челябинским событием. В связи с неоднозначностью трактовки этих и других ионосферных данных и для выяснения зависимости их от Челябинского события были проведены обработка и анализ «сырых» данных станций вертикального зондирования ионосферы, так как автоматическая обработка (выделение характерных ионосферных параметров из высотно-частотных характеристик сигналов) в ряд моментов времени для некоторых станций дает неверный результат.

Результаты вертикального зондирования ионосферы

Для компактного представления результатов одноточечного зондирования ионосферы за длительный период времени был применен метод построения двумерной сводной картины состояния ионосферы в координатах высота-время [Акчурина и др., 2013], позволяющий визуализировать вариации характерных параметров ионосферы и выявлять их временные характеристики. Непосредственный вид такой сводной картины (карты), являющейся разверткой по времени высотного профиля какого-либо параметра, зависит от того, какой параметр (частота, амплитуда) на ней представлен. Так, A_z -карта представляет собой сводные гистограммы сумм амплитуд всех отражений вдоль частотной оси на данной высоте. Она позволяет выделять (подчеркивать) сравнительно короткопериодные высотные и амплитудные вариации. В свою очередь, F_m -карта, на которой в координатах h' – время (где h' – кажущаяся высота) построены изолинии максимальных для данной высоты частот отражений в заданный момент времени, позволяет оценить динамику электронной концентрации в точке наблюдения.

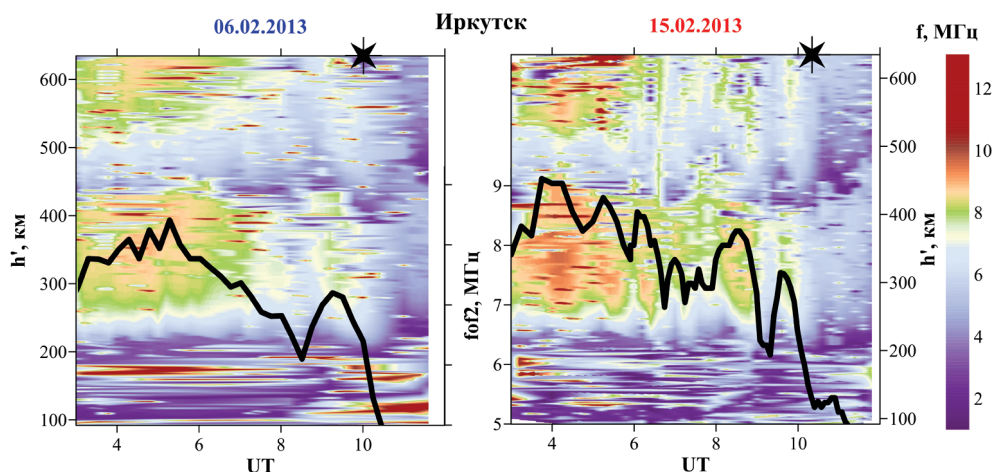


Рис. 1. F_m -карты в координатах кажущаяся высота (h') – время (UT) для 6 и 15 февраля 2013 года для Иркутска.

Здесь и далее черными звездочками обозначены ночные терминаторы, белыми – дневные. Черные кривые – зависимости от времени критической плазменной частоты F2-слоя ионосферы ($foF2$), обработанные вручную.

На рис. 1 представлены 9-ти часовые, начиная с трех часов UT, F_m -карты для двух дней 2013 года – 15 и 6 февраля (контрольный день с такой же, как и 15 февраля, магнитной активностью), представляющие собой результат обработки данных ионозонда вертикального зондирования, расположенного в Иркутске ($52^{\circ}17'$ с.ш., $104^{\circ}18'$ в.д.). Здесь h' – кажущаяся высота, f – максимальная для данной высоты частота отражения, черными звездочками обозначены ночные терминаторы, черные кривые – зависимости от времени критической плазменной частоты F2-слоя ионосферы ($foF2$), обработанные вручную. Рисунки отчетливо демонстрируют появление 15 февраля возмущений электронной концентрации на h' от 250 до 400 км, не наблюдавшихся в контрольный день. Первое возмущение пришло через ~40 ми-

нут от момента основной вспышки излучения. Расстояние от места вспышки до Иркутска более 2000 км.

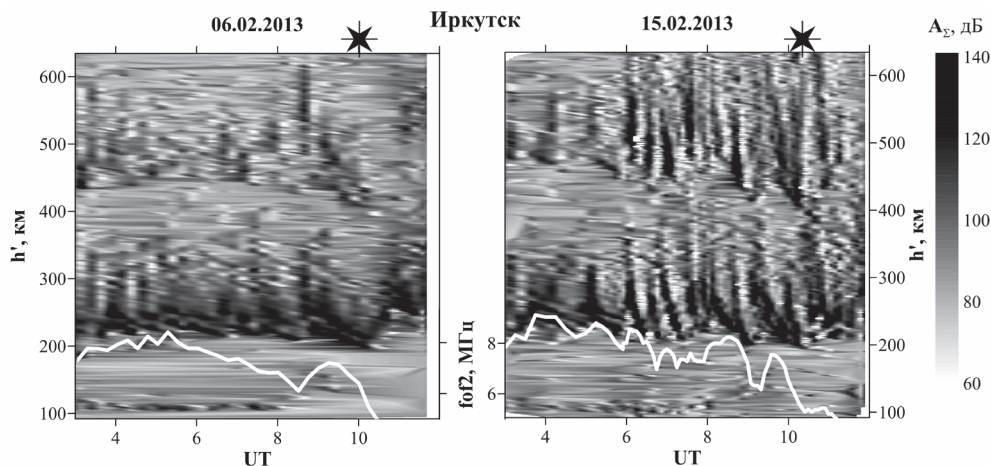


Рис. 2. A_2 -карты в координатах кажущаяся высота (h') – время (UT) для 6 и 15 февраля 2013 года для Иркутска.
Белые кривые – зависимости от времени foF2

Рис. 2 аналогичен рис. 1, но в отличие от рис. 1, он представляет собой A_2 -карты, для наглядности обработанные фильтром Прюита, используемым для выделения градиента яркости границ объектов. Такой метод визуализации позволяет выделять короткопериодные высотные и амплитудные вариации, так как на каждой высоте выполняется суммирование амплитуд зарегистрированных сигналов и не делается никаких попыток по удалению сигналов близких к критическим частотам [Акчурун и др., 2013]. Оба эти условия позволяют ясно наблюдать короткопериодные перемещающиеся ионосферные возмущения (ПИВ) по вытянутым вверх высотным вариациям (см. рис. 2), где действующая высота сильно отклоняется от истинной.

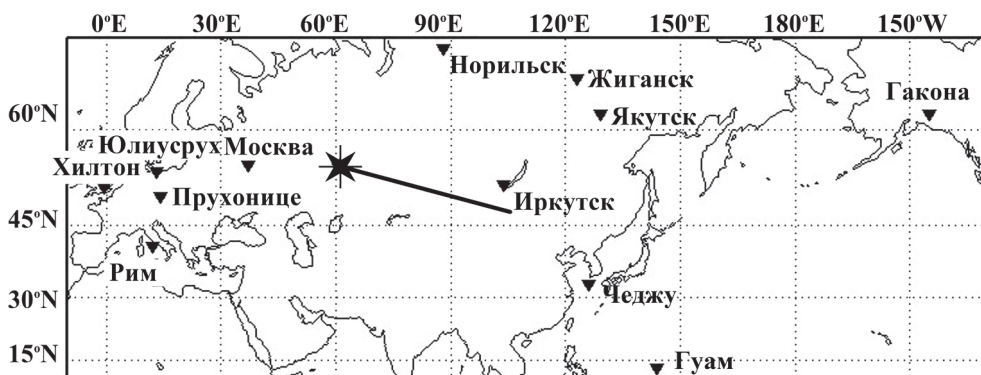


Рис. 3. Карта с расположением станций.
Черная линия – траектория пролета метеорита

Аналогичные A_z -карты были построены для 12 станций вертикального зондирования, расположенных в Норильске, Жиганске, Якутске, Иркутске, Гаконе (Аляска), Гуаме (США), Чеджу (Южная Корея), Москве, Юлиусрухе (Германия), Прухонице (Чехия), Риме (Италия), Хилтоне (Великобритания) для двух дней 2013 года – 15 и 6 февраля. Расположения этих станций показаны треугольниками на географической карте на рис. 3. Звездочкой отмечено место основного энерговыделения, сопровождавшегося вспышкой излучения, черной линией – предполагаемая траектория пролета метеорита [Borovic'ka et al., 2013]. Анализ этих карт показал наличие 15 февраля гораздо более структурированных, чем 6 февраля, как короткопериодных, так и долгопериодных возмущений. Частота съема ионограмм на различных станциях была разной, что затрудняет возможность четко выделить их периоды по A_z -картам. Так, в Гаконе, Чеджу и в Иркутске (начиная с 5 часов) эта частота составляла величину порядка 5 минут, в то время как на других станциях она равнялась 15 минутам. Характер возмущений и время их прихода в различные точки отличаются. ПИВ разного вида идентифицируются на всех станциях. Причем, есть возмущения, которые не зависят от положения терминатора, а есть – зависящие, с большим периодом и длиной волны. Спектральный анализ A_z -карт показал качественное и количественное различия для 6 и 15 февраля, причем 15 февраля на всех станциях (кроме станции Гуам) появились одни и те же доми-

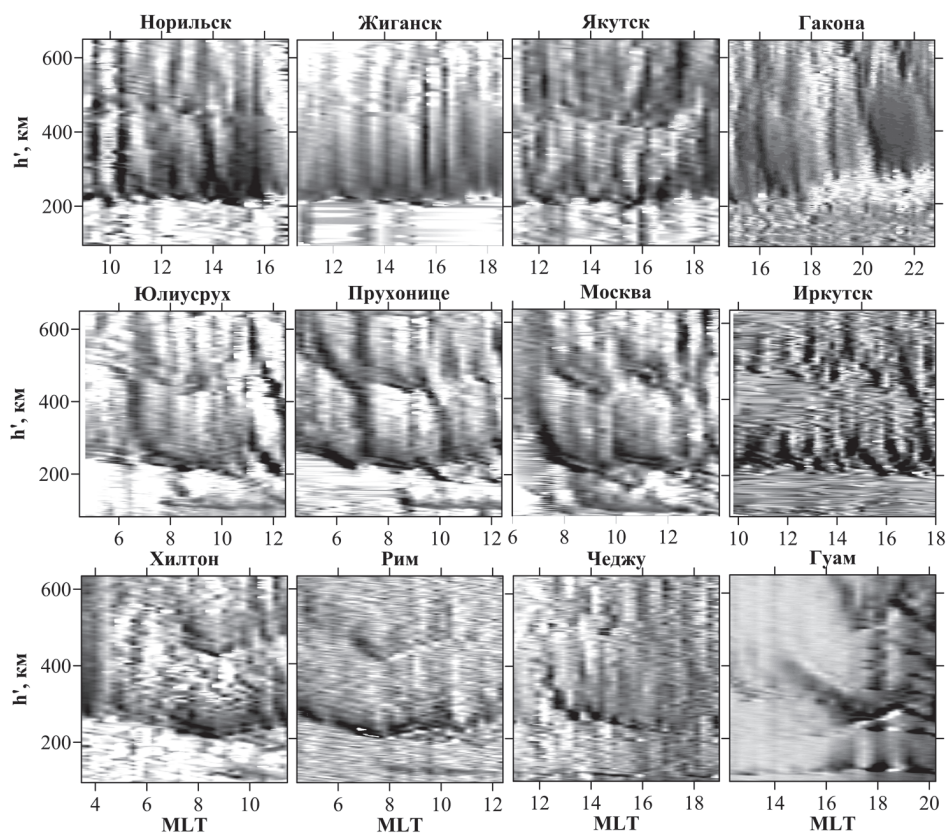


Рис. 4. A_z -карты в координатах кажущаяся высота (h') – время в MLT, начиная с 03:00 в UT для 15 февраля (б) 2013 года для всех рассмотренных станций

нирующие спектральные компоненты. Что касается Гуама, то 15 февраля над ним, судя по A_z -карте, наблюдались спорадические метеорные следы в Es-слое после 8 UT [Акчурин и др., 2013].

Дополнительно все приведенные A_z -карты были перестроены в координатах h' -MLT (магнитное локальное время), которое имеет свое значение в каждый момент UT в каждой точке с определенными географическими координатами, то есть зависимость от UT, строго говоря, не является линейной. Возмущения ионосферы, имеющие электродинамическую природу, имеют определенную локализацию по MLT [Tomital et al., 2011], в то время как возмущения, вызванные динамикой нейтральной ионосферы, связаны с солнечным локальным временем, или, что то же самое с UT.

На рис. 4 для всех станций приведены A_z -карты, на которых зависимость от UT переведена в зависимость от MLT, отсчитанное от момента 3:00 UT (каждая станция имеет собственный ход MLT). Из рис. 4 видно, что все станции среагировали практически одновременно. Наблюдаемые ПИВ можно условно разделить на три характерных группы (по их структурным особенностям): в Норильске, Жиганске, Якутске, Гаконе (верхняя часть рисунка), Юлисрухе, Прухонице, Москве, Иркутске (средняя часть) и Хилтоне, Риме, Чеджу, Гуаме (нижняя часть).

На рис. 5 приведены зависимости критической плазменной частоты F2-слоя (foF_2) от времени в UT (слева) и в приведенном ΔMLT (справа), отсчитанном от момента основного энерговыделения (обозначено пунктиром), для Якутска, Жиганска, Норильска, Иркутска и Москвы. Черные кривые относятся к 15 февраля, серые – к контрольному дню 6 февраля. Черные и белые звездочки соответствуют ночному и дневному терминатору для каждой из географических точек, соот-

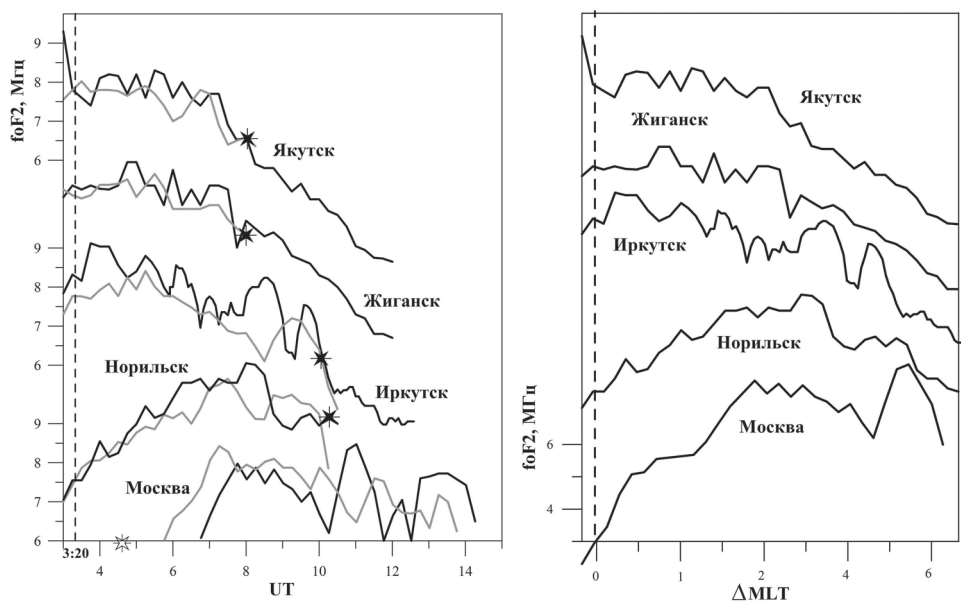


Рис. 5. Зависимости критической плазменной частоты F2-слоя (foF_2) от времени в UT (слева) и в приведенном ΔMLT (справа), отсчитанном от момента основного энерговыделения (обозначено пунктиром), для Якутска, Жиганска, Норильска, Иркутска и Москвы.

Черные кривые относятся к 15 февраля, серые – к контрольному дню 6 февраля

ветственно. Как видно из рисунка, короткопериодные возмущения foF2 начались практически одновременно в этих точках, что свидетельствует об их возможном электродинамическом механизме распространения; долгопериодные возмущения приходили в разные места с различными временами задержки.

Результаты численного моделирования газодинамических эффектов Челябинского болида

При моделировании газодинамических эффектов в атмосфере Земли, вызванных пролетом Челябинского болида, был проведен 3D численный расчет газодинамического течения с выделением энергии вдоль траектории в соответствии с кривой светимости [Емельяненко и др., 2013] и основной вспышкой на высоте 25 км. В расчетах полное энерговыделение вдоль траектории составляло величину примерно 440 кТ в тротиловом эквиваленте, наклон траектории – 16 градусов к горизонтальной поверхности, скорость входа в атмосферу на высоте 90 км – 17,8 км/с. Начальные данные задавались в виде стандартной атмосферы CIRA (<http://ccmc.gsfc.nasa.gov/modelweb/atmos/cospar1.html>). Использовалась программа, написанная на основе разработанной В.В. Шуваловым программы SOVA [Shuvalov, 1999].

На рис. 6 представлены распределения давления относительно фонового (p/p_0) в вертикальной плоскости вдоль траектории пролета в различные моменты времени $t = 20$ (а), 80 (б), 130 (в), 200 с (г) после начала расчета.

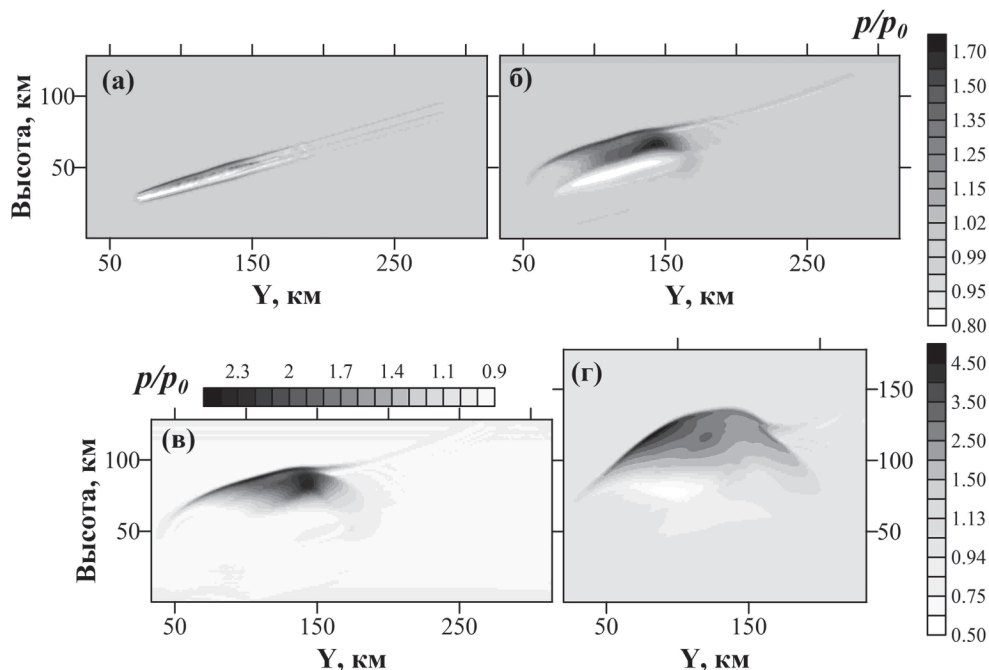


Рис. 6. Распределения давления относительно фонового p/p_0 в вертикальной плоскости вдоль траектории пролета в различные моменты времени $t = 20$ (а), 80 (б), 130 (в), 200 с (г) после начала расчета

Расчет демонстрирует процесс образования цилиндрической ударной волны по траектории пролета, ускорение ее вверх при выходе в среду с понижающейся плотностью, достижение фронтом волны E-слоя ионосферы (высота 120 км) в момент времени $\sim 2,5\text{--}3$ минуты после основного энерговыделения. Этот результат численного моделирования подтверждается данными SuperDARN радара [Бернгардт и др., 2013], расположенного вблизи Челябинска, которые показали наличие волнового возмущения на высоте 120 км в 3:23 UT (через 3 минуты после вспышки излучения). На рис. 7 показаны распределение расчетной плотности газа и векторы его скорости в горизонтальной плоскости на высоте 120 км в момент времени 200 с (177 с после вспышки).

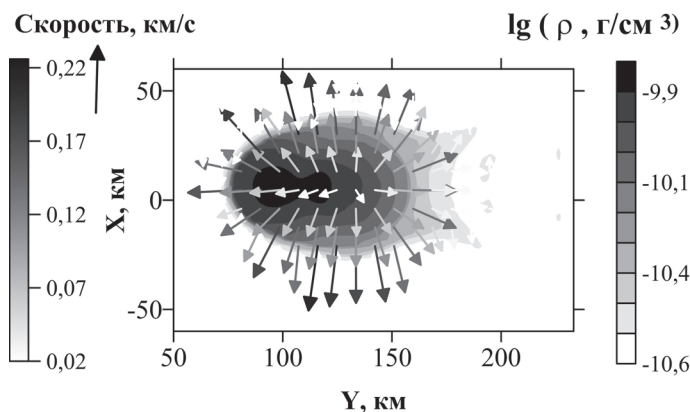


Рис. 7. Распределение плотности газа ρ и векторы его скорости в горизонтальной плоскости на высоте 120 км в момент времени 200 с после начала расчета.
Стрелкой указан масштаб скорости, соответствующий левой цветовой шкале

На рис. 8 приведены распределения p/p_0 в вертикальной плоскости вдоль траектории пролета в последующие моменты времени $t = 300$ (а), 400 (б), 500 (в), 850 с (г) после начала расчета. Ускоряющаяся при подъеме в разреженные слои атмосферы ударная волна через 5 минут после основной вспышки достигает высот F2-слоя (220–250 км). За ударной волной частицы газа устремляются вверх и затем падают снова вниз в поле силы тяжести. При обратном падении кинетическая энергия воздуха, тормозящегося в плотных слоях, переходит в тепловую, образуется отраженная ударная волна, нагретый газ поднимается в вышележащие слои атмосферы, и процесс повторяется. Этот процесс можно рассматривать как нелинейную стадию образования акустико-гравитационных волн, которые затем могут распространяться на значительные расстояния, и, приводя к возмущению плотности на высоте F2-слоя, порождать осцилляции электронной концентрации и критической плазменной частоты, наблюдаемые в ионограммах в виде ПИВ [Ахмедов, 2004]. На рис. 9 приведены распределение расчетной плотности газа и векторы его скорости в горизонтальной плоскости на высоте 250 км в момент времени 850 с (примерно 14 минут после основной вспышки). Скорость переднего фронта возмущения ~ 1 км/с, а размер – порядка 500–600 км. Как следует из результатов расчетов, через 14 минут после основной вспышки излучения на высоте F2-слоя ионосферы (см. рис. 8,г) образуется неоднородная волновая структура, которая и может рассматриваться как источник наблюдаемых осцилляций высоты F2-слоя. Оценка времени прихода этих

возмущений (от момента 14 минут после основного энергосвечения и с учетом полученной конфигурации возмущения на высоте 250 км, приведенной на рис. 9) по скорости ионного звука на этой высоте 1,14 км/с дает значения от 30 мин до 1 часа, что неплохо согласуется с данными наблюдений (см. рис. 4).

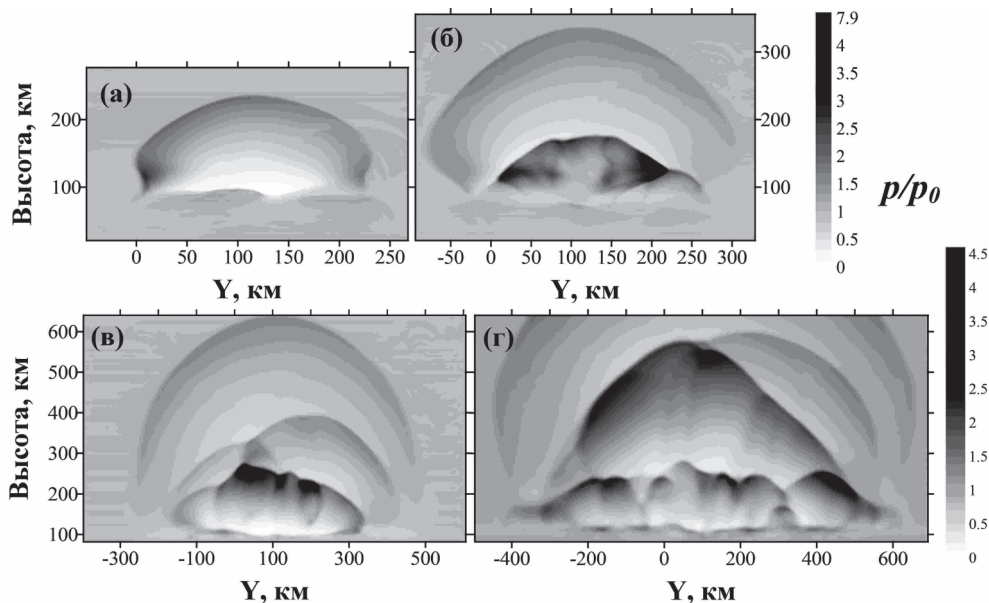


Рис. 8. Распределения p/p_0 в вертикальной плоскости вдоль траектории пролета в моменты времени $t = 300$ (а), 400 (б), 500 (в), 850 с (г) после начала расчета

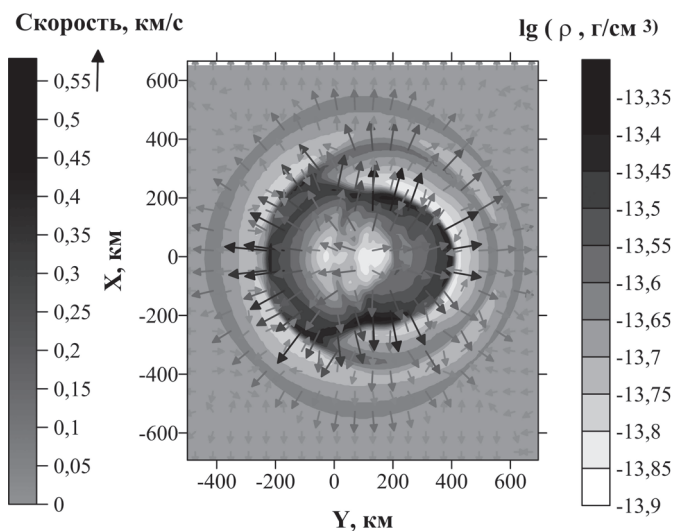


Рис. 9. Распределение плотности газа ρ и векторы его скорости в горизонтальной плоскости на высоте 250 км в момент времени 850 с после начала расчета.

Стрелкой указан масштаб скорости, соответствующий левой цветовой шкале

Выводы и направления дальнейших исследований

Обработка данных станций вертикального ионосферного зондирования позволяет выдвинуть гипотезу, что Челябинское событие вызвало возмущения ионосферы Земли на расстояниях до нескольких тысяч километров.

Часть наблюдаемых возмущений может быть объяснена газодинамическими процессами в нейтральной атмосфере Земли (включая нелинейную стадию возникновения акустико-гравитационных волн), возникшими при пролете метеорита и основном энерговыделении на высоте ~ 25 км. Дальнейшие исследования должны быть направлены на количественные оценки воздействия на ионосферу потоков излучения, вызывающих появление пятна фотоионизации на высоте 100–120 км, наблюдавшегося радаром SuperDARN в 200 км западнее точки энерговыделения на высотах Е-слоя, и возможных электродинамических механизмов распространения возмущений в ионосфере.

Авторы выражают благодарность Global Ionospheric Radio Observatory (GIRO) и GIRO Principal Investigator B. W. Reinisch and Ivan Galkin of the University of Massachusetts Lowell за предоставление возможности использовать данные сети ионозондов и Олегу Бернгардту (ИСЗФ СО РАН) за ценные обсуждения.

Литература

Акчурин А.Д., Юсупов К.М., Шерстюков О.Н., Ильдиряков В.Р. Выделение быстро текущих и мелкомасштабных неоднородностей на одномоментных ионограммах ионозонда Циклон // Гелиогеофизические исследования. 2013. Вып. 4. С. 101–110.

Ахмедов Р.Р. Численное моделирование генерации акустико-гравитационных волн и ионосферных возмущений от наземных и атмосферных источников // Автореферат диссертации на соискание ученой степени к. ф.-м.н. 2004.

Бернгардт О.И., Добрынина А.А., Г.А. Жеребцов, Михалев А.В., Первалова Н.П., Ратовский К.Г., Рахматулин Р.А., Саньков В.А., Сорокин А.Г. Геофизические явления, сопровождавшие падение Челябинского метеорита // ДАН. 2013. Т. 452, № 2. С. 205–207.

Гивишвили Г.В., Леценко Л.Н., Алпатов В.В., Григорьева С.А., Журавлев С.В., Кузнецов В.Д., Кусонский О.А., Лапшин В.Б., Рыбаков М.В. Ионосферные эффекты, стимулированные Челябинским метеоритом // Астрономический Вестник. 2013. Т. 47, № 4. С. 304–311. DOI: 10.7868/S0320930X13040154

Емельяненко В.В., Попова О.П., Чугай Н.Н., Шеляков М.А., Пахомов Ю.В., Шустов Б.М., Шувалов В.В., Бирюков Е.Е., Рыбнов Ю.С., Маров М.Я., Рыхлова Л.В., Нароенков С.А., Карташова А.П., Харламов В.А., Трубецкая И.А. Астрономические и физические аспекты Челябинского события 15 февраля 2013 г. // Астрономический Вестник. 2013. Т. 47, № 4. С. 262–277. DOI: 10.7868/S0320930X13040130.

Лосева Т.В., Кузьмичева М.Ю. Оценка геомагнитного эффекта при Тунгусском событии 1908 года // Физика межгеосферных взаимодействий / Под редакцией академика В.В. Адушкина – М.: ГЕОС, 2010.

Тертышников А.В., Алпатов В.В., Глухов Я.В., Давиденко Д.В. Региональные возмущения ионосферы и ошибки позиционирования наземного навигационного приемника при взрыве Челябинского (Чебаркульского) метеороида 15.02.2013 г. // Гелиогеофизические исследования. 2013. Вып. 5. С. 65–73.

Borovic'ka Jir'ı', Spurny' Pavel, Brown Peter Wiegert, Paul, Kalenda Pavel, Clark David & Shrbeny' Luka's' The trajectory, structure and origin of the Chelyabinsk asteroidal impactor // Nature. 2013. V. 503. PP. 235–237.

Kuzmicheva M.Yu., Losseva T.V. 43rd Lunar and Planetary Science Conference, held March 19–23, 2012 at The Woodlands, Texas. LPI Contribution No. 1659, id.2319. (<http://www.lpi.usra.edu/meetings/lpsc2013/eposter/2765.pdf>).

Shuvalov V.V. Multi-dimensional hydrodynamic code SOVA for interfacial flows: Application to the thermal layer effect // *Shock Waves*. 1999. 9. PP. 381–390.

Tomita I. S., Nos'e I. M., Iyemori I. T., Tohl H., Takeda I. M., Matzka J., Bjornsson G., Saemundsson T., Janzhura A., Troshichev O., and Schwarz G. Magnetic local time dependence of geomagnetic disturbances contributing to the AU and AL indices // *Ann. Geophys.* 2011. V. 29, p. 673–678. DOI:10.5194/angeo-29-673-2011.