

ГЛОБАЛЬНЫЕ ИОНОСФЕРНЫЕ ЭФФЕКТЫ, ВЫЗВАННЫЕ ЧЕЛЯБИНСКИМ СОБЫТИЕМ 15.02.2013 г.

М.Ю. Кузьмичева, Т.В. Лосева

Приведены данные регистрации возмущений в ионосфере Земли, вызванных падением Челябинского метеорита 15 февраля 2013 года. Обсуждаются физические механизмы, объясняющие эти эффекты и причины отсутствия геомагнитного эффекта после падения метеорита.

Данные наблюдений

Падение метеорита в Челябинске 15 февраля 2013 г. вызвало мощные возмущения в ионосфере Земли на высотах F2-слоя, зарегистрированные в диапазоне долгот от Якутска до Западной Европы. Возмущения регистрировались независимо станциями томографии ионосферы и сетью ионозондов. По данным станций вертикального зондирования в ионосфере наблюдались осцилляции критической

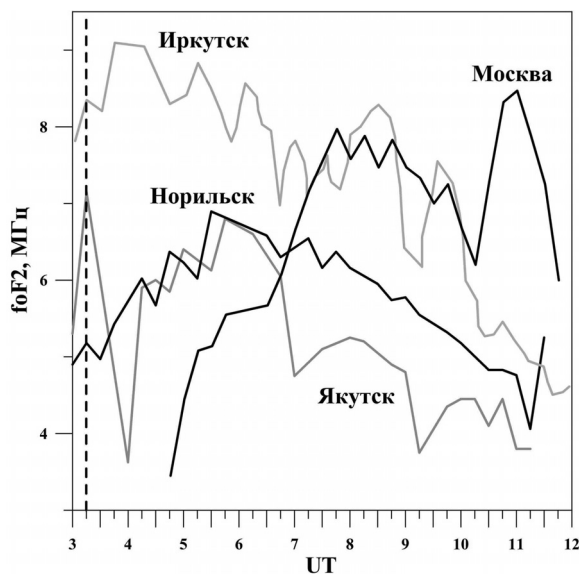


Рис. 1. Временная зависимость критической частоты $foF2$ (МГц) над различными станциями вертикального зондирования ионосферы. Пунктир — основная вспышка излучения

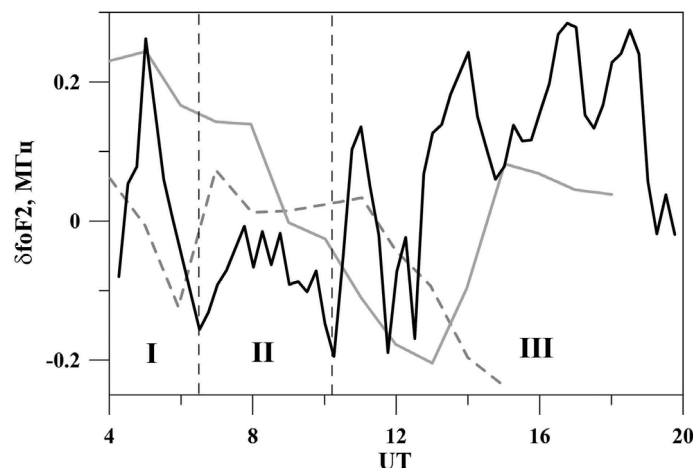


Рис. 2. Временная зависимость отклонения критической частоты $foF2$ (МГц) от часовых 28-дневных медианных значений над Москвой (черная кривая) – 15.02.2013; синхронизированные со временем вспышки (серые кривые): сплошная – 01.11.1962 г., пунктир – 06.10.1961 г.

плазменной частоты F2-слоя ($foF2$), что свидетельствует о соответствующих изменениях электронных концентраций, которые сопровождались уменьшением высоты F2-слоя с 250–270 км до 220–230 км. На рис. 1 приведены зависимости $foF2$ от времени, полученные из базы данных [<http://ulcar.uml.edu/DIDBase>] для Якутска (~3450 км от Челябинска на высоте 220 км), Иркутска (~2200 км), Норильска (~1550 км) и Москвы (~1200 км). Пунктирной линией обозначено предполагаемое время первого энерговыделения, сопровождающегося вспышкой излучения. Данные западноевропейских ионозондов (Julisruch, Pruhonice) коллинеарны с московскими. Переход от абсолютных значений $foF2$ к отклонениям $\delta foF2$ от часовых 28-дневных медианных значений позволяет выделить три основные стадии развития возмущений (на примере московской станции, рис. 2 – черная кривая), не наблюдавшихся в соседние дни. Стадия I соответствует приходу одиночного возмущения в Москву через 40 минут после вспышки; стадия II – приходу трех-четырех возмущений с периодом 30 минут в Москву через ~3 часа 20 минут, в Якутск через ~40–50 минут, в Норильск через ~30–40 минут (раньше, чем в Якутск) (см. рис. 1) и через ~30–40 минут после вспышки в Иркутск; стадия III – приходу длиннопериодных (2–2,5 часа) возмущений с задержкой по времени в ~3 часа после стадии II. Для сравнения на рис. 2 серыми кривыми приведены аналогичным образом построенные возмущения $\delta foF2$, зафиксированные на московской станции, вызванные двумя ядерными взрывами в Семипалатинске (46.23N, 72.52E). Здесь: серая пунктирная линия соответствует взрыву с энергией 40 кТ на высоте 22,7 км, произведенному 06.10.1961 г. в 7:15 UT, серая сплошная – взрыву с энергией 300 кТ, произведенному 01.11.1962 г. в 9:15 UT. Времена этих взрывов на рисунке приведены ко времени вспышки Челябинского события. Аналогичные картины осцилляций после высотных ядерных взрывов наблюдались на всех среднеазиатских станциях высотного зондирования.

По данным томографирования среднеширотной ионосферы [Гвишвили и др., 2013] возмущения электронной плотности появились в 06:39 UT и захватили высоты 200–700 км в широтном диапазоне 52–56 N. Аналогичные данные были по-

лучены на дигизонде в Иркутске, что подтверждает данные ионозондов и доказывает глобальный характер возмущения ионосферы Земли на высотах F2-слоя. Необходимо подчеркнуть, что первичные ионограммы не содержат никаких аномалий (диффузность F2-слоя, появление кратных отражений или сигнатур ПИВ, спорадических Es слоев). Ионосфера испытывала только регулярные колебания foF2. Геомагнитная обстановка в анализируемый период была спокойная, что позволяет исключить возможность наблюдения ионосферных бурь другого происхождения.

Принципиальным фактом, который необходимо учесть при построении физической модели явления, является отсутствие возмущений в нижней ионосфере Земли. По данным регистрации сигналов СДВ-ДВ передатчиков в ГФО «Михнево» ИДГ РАН, выполненной тремя независимыми средствами измерений (приемник-измеритель Rhode&Shwarz, электрическая и магнитная антенны, ВЧ магнитометр METRONIX ADU-07) падение метеорита не вызвало никаких изменений в амплитудах и фазах сигналов на трассах, проходящих в зоне томографии и измерений на ионозондах.

Необходимо также отметить тот факт, что измерения вариаций геомагнитного поля на станции Arti сети Intermagnet [<http://www.intermagnet.org>] с координатами 56,43 N, 58,57 E, ближайшей к Челябинску (55,09 N, 61,24 E; 165 км к западу и 150 км к северу) показали, что падение Челябинского метеорита никак не проявилось в магнитограммах.

Любая физическая модель Челябинского события должна непротиворечивым образом объяснить: «пробой» F2-слоя ионосферы (200–700 км), отсутствие возмущений в D-слое (40–80 км), отсутствие геомагнитных эффектов, природу трех стадий возмущений, почему возмущения второй стадии наблюдались сначала в Иркутске, затем в Норильске, Якутске и с запозданием более чем в три часа в Москве и Европе.

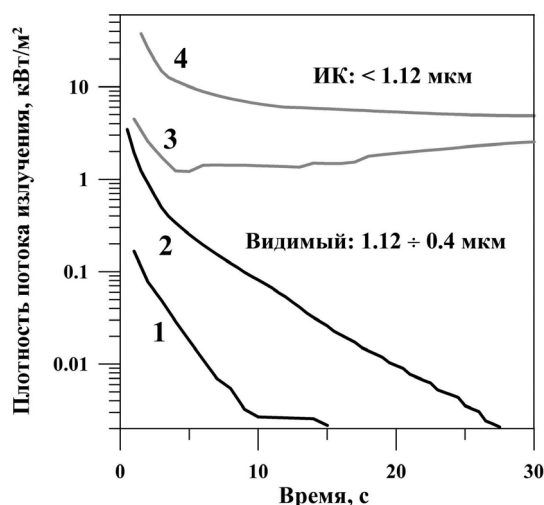
В качестве источника первичной информации о Челябинском событии использованы данные спутника Meteosat-9 [http://www.eumetsat.int/Home/Main/Image_Gallery/ImageLibrary/index.htm?l=en], из которых было получено примерное направление пролета. По данным японского спутника MTSAT-2 стратосферный след от метеорита сохранялся в течение 9 часов, и его температура превышала температуру окружающего газа на величину порядка 70 C ([Satellite Views of Meteor Vapor Trail Over Russia. CIMSS Satellite Blog (15 February 2013)]).

Обсуждение данных наблюдений

По данным видеорегистратора в момент времени ~3:20 UT (3:15 UT по другим данным) была зафиксирована интенсивная вспышка излучения в видимом диапазоне длин волн. При этом плотность фонового потока солнечного излучения (~2 Вт/м² в видимом диапазоне, так как в это время в Челябинске был рассвет) была значительно превышена. Однако отсутствовали пожары и ожоги глаз у людей и животных. С помощью численного моделирования одномерной радиационно-газодинамической задачи о движении газа (после интенсивного энерговыделения на высоте 40 км) в поле силы тяжести в стратифицированной атмосфере с реальным уравнением состояния воздуха была проведена серия расчетов с различными начальными температурами и подобрана температура, для которой выполняются вышеперечисленные характерные радиационные параметры явления. На рис. 3 приведены зависимости от времени плотностей потоков излучения в видимом (чер-

Рис. 3. Временные зависимости плотностей потоков излучения в видимом (черные кривые) и в ИК (серые кривые) диапазонах длин волн при начальном повышении температуры.

Кривые 1 и 3 получены при температуре 0,5 эВ, кривые 2 и 4 – при температуре 1,2 эВ



ные кривые) и в инфракрасном (серые кривые) диапазонах длин волн для вариантов расчетов при начальном повышении температуры T_0 на высоте 40 км. Кривые 1 и 3 соответствуют $T_0 = 0,5$ эВ, кривые 2 и 4 – 1,2 эВ. При меньших значениях T_0 плотность потока излучения получается меньше фоновой. Как следует из [Атаманюк и др., 1986], первая степень ожоговой травмы у человека вызывается световым излучением видимого диапазона с энергией на единицу площади 80–160 кДж/м², а пожары – инфракрасным излучением 250–400 кДж/м². Оценочные расчеты дают для приведенных значений температур величину энергии излучения на единицу площади в видимом диапазоне ~ 0,7 и 50 кДж/м², а в ИК диапазоне – ~140 и 500 кДж/м², соответственно. С фактами отсутствия пожаров и ожогов глаз у людей и животных согласуется $T_0 \sim 0,5$ эВ или 6000 К. Максимальная плотность потока излучения в видимом диапазоне при этом равна 300 Вт/м², что не противоречит тому факту, что вспышка излучения затмевала падающий солнечный свет. При этом полученная величина яркостной температуры в ИК диапазоне длин волн на высоте 800 км (высота спутника EUMETSAT) через три часа после вспышки ~249 К хорошо согласуется с данными спутника Meteosat-7 (спутник зафиксировал пятно с яркостной температурой в ИК диапазоне ~245÷250 К).

Согласно подходу [Немчинов и др., 1999], в области энергосвободы нарушается гидростатическое равновесие. Частицы газа устремляются вверх и, достигнув разреженных слоев атмосферы, начинают двигаться по баллистическим траекториям 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. Такое упрощенное численное решение позволяет определить некоторые характеристики течения (периоды колебаний атмосферы, скорость затухания, плотности потоков излучения в различных диапазонах длин волн). На рис. 4 представлены осцилляции плотности на высоте 220 км (черная кривая) и 60 км (серая кривая). Первое возмущение плотности можно трактовать как возмущение стадии I (рис. 2). Время распространения этого возмущения до Москвы со скоростью звука на высоте 220 км (660 м/с) составляет величину ~38 минут, что хорошо согласуется с данными ионограммы. Амплитуда возмущений в D-слое на порядок меньше, чем в F2-слое и время их затухания всего 15–20 минут.

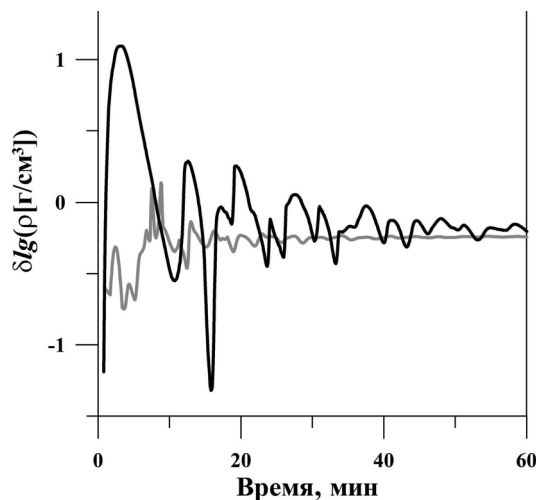


Рис. 4. Временные зависимости осцилляций плотности на высоте 220 км (черная кривая) и на высоте 60 км (серая кривая), вызванных основным энерговыделением над Челябинском

Объяснить последовательности времен прихода ионосферных возмущений (после падения) стадий II и III в точки наблюдения (Иркутск, Норильск, Якутск, Москва, Европа) энерговыделением и вспышкой излучения только вблизи Челябинска невозможно. Наблюдаемая последовательность развития возмущений в ионосфере требует локализации источника назад по траектории примерно на 101-ом меридиане (например, над Братском). Эта точка соответствует расстоянию порядка 1500–2000 км от Челябинска. На стадии пролета метеороид не мог вызвать соответствующих ионосферных возмущений на высоте 220 км, так как он пролетал эту точку слишком высоко (на высоте ~500 км при угле наклона траектории 14°).

Как уже было упомянуто, японским спутником было зафиксировано длительное существование горячего разреженного следа. Наличие следа при пролете метеороида принципиально меняет характер течения после основного энерговыделения. Вместо медленно всплывающего тора, формирующегося, например, при мощном ядерном взрыве, возникает направленная вдоль следа струя (плюм). Существование таких плюмов подтвердилось при наблюдении падения фрагментов падения кометы Шумейкера-Леви-9 в атмосферу Юпитера и его численном моделировании [Nemtchinov, Loseva, 1994; Boslough, Crawford, 1997]. Численные эксперименты

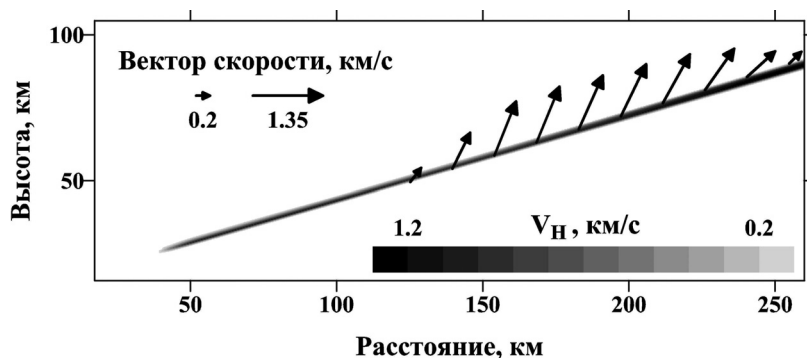


Рис. 5. Пространственное распределение скоростей атмосферного газа в плюме, полученное с помощью 3D численного моделирования

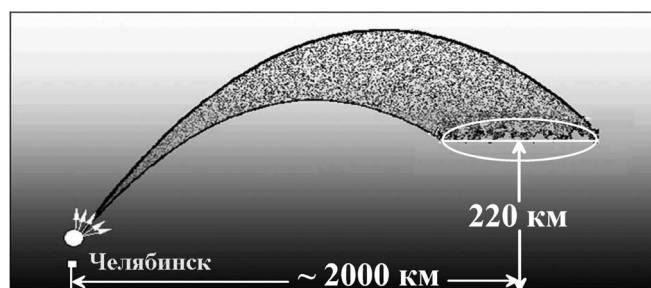


Рис. 6. Схема эволюции плюма

показали, что формирование плюма в верхних слоях атмосферы начинается даже раньше, чем падающее тело затормозится и потеряет свою энергию. В атмосфере Земли плюм образуется уже на стадии пролета крупного, более 10 м космического тела [Шувалов, 1999] (размер челябинского метеорита оценивается в ~15 метров).

Наличие плюма, вылетающего в разреженные слои атмосферы и затем падающего обратно на ее плотные слои, обеспечивает перенос возмущения на большие расстояния. Для моделирования этих эффектов был проведен 3D численный расчет газодинамического течения в атмосфере при общем энерговыделении 500 кТ, распределенном при пролете равномерно по массе вдоль траектории, наклоненной под углом 16 градусов к горизонтальной поверхности. Использовалась программа, написанная на основе разработанной В.В. Шуваловым программы SOVA [Shuvalov, 1999]. Скорость метеороида была выбрана равной 17,8 км/с. На рис. 5 представлены векторы скорости газа в вертикальной плоскости в момент времени 20 с и распределение горизонтальной компоненты скорости. В отличие от случая точечного энерговыделения формируется узкая направленная струя атмосферного воздуха, распространяющаяся под углом к поверхности с горизонтальной скоростью порядка 1,2 км/с, то есть плюм. Время прохождения расстояния 2000 км с такой скоростью – ~27 минут. На рис. 6 схематически показана эволюция плюма. Ионосферные осцилляции на высоте 220 км, вызванные падением плюма, показаны на рис. 7. Амплитуда приведенных возмущений хорошо согласуется с амплитудой колебаний критической плазменной частоты F2-слоя (см. рис. 2).

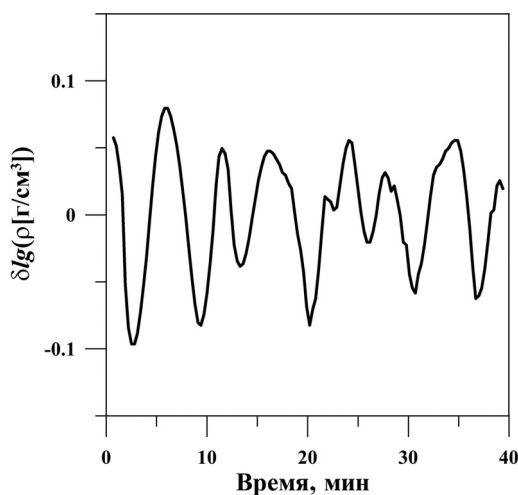


Рис. 7. Временные зависимости осцилляций плотности на высоте 220 км, вызванных падением плюма

Можно предположить, что падение струи спровоцировало ионосферные возмущения стадии II и явилось источником длиннопериодных возмущений (внутренних гравитационных волн) стадии III. Для детального объяснения механизмов их возбуждения необходимы более сложные трехмерные модели явления.

Непохожесть ионосферных эффектов ядерных взрывов и Челябинского события (рис. 2) можно рассматривать как доказательство неправомочности моделирования последствий падения Челябинского метеорита точечным взрывом.

Оценки геомагнитных возмущений

Падение космических тел может вызывать возмущения геомагнитного поля Земли либо из-за нарушения токовой системы ионосферы в Е-слое [Иванов, 1967], либо из-за крупномасштабных газодинамических течений в Е-слое при движении газа поперек геомагнитного поля [Лосева, Кузьмичева, 2010; Kuzmicheva, Losseva, 2012]. Поэтому при исследовании последствий Челябинского события рассматривались две гипотезы: точечный взрыв и энерговыделение вдоль наклонной траектории. При расчете геомагнитных возмущений, вызванных точечным взрывом с тротиловым эквивалентом 300 кТ на высоте 25 км, в качестве начальных данных были взяты газодинамические параметры в момент времени 10 мин (когда возмущение после взрыва достигает Е-слоя ионосферы), полученные из расчета, проведенного В.В. Шуваловым по его программе [Shuvalov, 1999]. Газодинамическая картина течения выглядит типичной: за убегавшей вверх ударной волной сформировались центральная струя с радиусом 50–80 км и тор с радиусом 100–200 км. Локальные возмущения относительной энергии и плотности на этих высотах невелики, в первом приближении ими можно пренебречь. Для расчета токов, генерируемых в ионосфере, использовались проводимости, соответствующие фоновым концентрациям и температурам в дневное время. За ударной волной в ионосфере в центральной части струи возникают крупномасштабные колебания поперек X -компоненты геомагнитного поля (Y -компонента много меньше), при этом генерируемые колебаниями возмущения геомагнитного поля взаимно гасят друг друга. Радиальный разлет газа в торе поперек Z -компоненты геомагнитного поля порождает кольцевой ток в ионосфере и приводит к генерации дипольного магнитного поля. Трехмерный расчет токов и магнитных полей при проверке обеих гипотез проводился на основе решения стационарных уравнений Максвелла по методике, описанной в работе [Лосева, Кузьмичева, 2010]. Полученная токовая система (слева) и возмущение Z -компоненты магнитного поля на поверхности Земли (справа), которое было наибольшим по величине среди возмущений других компонент, показаны на рис. 8. Возмущения геомагнитного поля могут достигать нескольких нТл, область возмущенных значений имеет радиус порядка 250 км, возмущения могут быть как положительными, так и отрицательными. Полученные значения возмущения геомагнитного поля сравнивались с магнитограммами ближайшей к Челябинску (координаты 55,09 N, 61,24 E) станции ARTI сети INTERMAGNET. Как уже говорилось, падение Челябинского метеорита никак не проявилось на магнитограммах. Эпицентр точечного энерговыделения, приближение которого мы используем, лежит в пределах 35 км от центра координат в расчетах (географические координаты 54,8 N, 61,455 E, по сейсмическим данным 55,12 N, 60,36 E). Для момента времени 10 мин после взрыва на станции ARTI ожидалось бы отрицательное возмущение Z -компоненты порядка 1 нТл или нулевое (близко к границе между положи-

тельными и отрицательными значениями). Через полчаса термик расширяется до 1000 км, в точке наблюдения в поведении Z -компоненты должен наблюдаться положительный тренд в несколько единиц нТл, которого нет на магнитограмме. Это означает, что приближение точечного взрыва не описывает отсутствие геомагнитного эффекта.

Для проверки второй гипотезы были использованы результаты расчетов газодинамического течения, приведенные на рис. 5. В расчете геомагнитных возмущений, вызываемых струей атмосферного газа. На рис. 9 показаны токовая система (слева) и возмущение Z -компоненты геомагнитного поля на поверхности Земли (справа). Точка с координатами (0,0) на правой панели рис. 10 находится на рас-

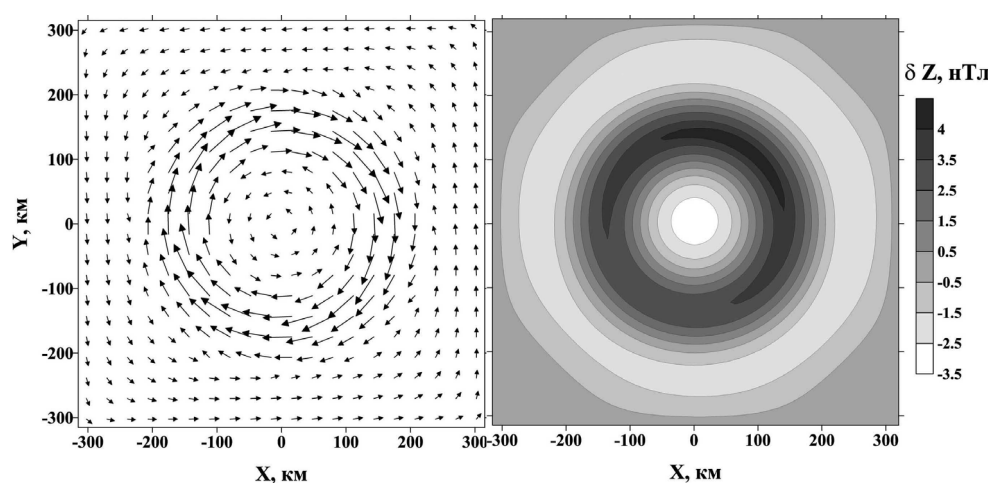


Рис. 8. Токовая система в Е-слое ионосферы (слева) и возмущение Z -компоненты геомагнитного поля на Земле (справа) в момент времени 10 мин после точечного взрыва 300 кТ на высоте 25 км

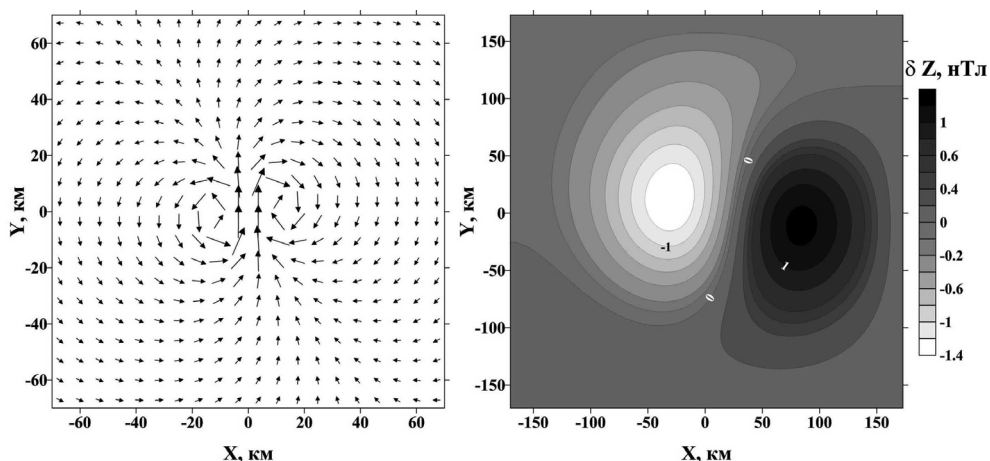


Рис. 9. Токовая система в Е-слое ионосферы (слева) и возмущение Z -компоненты геомагнитного поля на Земле (справа) в момент времени 2 мин после энергосвечения 300 кТ вдоль наклонной траектории

стоянии 100 км к востоку от г. Челябинска. Соответственно, возмущения в районе станции ARTI, расположенной на северо-западе от г. Челябинска, равны нулю, что согласуется с отсутствием геомагнитных возмущений на этой конкретной станции.

Заключение

Челябинское событие 15.02.2013 вызвало глобальные возмущения ионосферы Земли на высотах F2-слоя, не затронув нижнюю ионосферу. Предложенная модель явления позволяет объяснить как возникновение осцилляций F2-слоя ионосферы, так и отсутствие возмущений в D-слое. Гипотеза атмосферного плюма объясняет наблюдаемую последовательность прихода возмущений F2-слоя: Иркутск, Норильск, Якутск, Москва, Европа. В рамках этой гипотезы удастся также объяснить отсутствие геомагнитного эффекта на ближайшей к г. Челябинску геомагнитной обсерватории. Показана неправомочность моделирования последствий падения челябинского метеорита точечным взрывом.

Авторы выражают благодарность А.Н. Ляхову за помощь в получении ионосферных данных, В.В. Шувалову за предоставление результатов численных расчетов точечного взрыва, А.В. Медведеву (ИСЗФ СОРАН) за данные Иркутского дигизонда.

Литература

- Атаманюк В.Г., Ширишев Л.Г., Акимов Н.И. Гражданская оборона М.: Высшая школа. 1986. С. 34, 126.
- Гвишивили Г.В., Лещенко Л.Н., В.В. 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.
- Григорян С.С. О движении и разрушении метеоритов в атмосферах планет // *Космические исследования*. 1979. Т. 17. № 6. С. 875–893.
- Иванов К.Г. О природе воздействия тунгусского падения на верхнюю атмосферу, геомагнитное поле и свечение ночного неба // *Геомагнетизм и аэрономия*. 1967. Т. VII. № 6. С. 1031–1035.
- 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. С. 261–268
- Немчинов И.В., Лосева Т.В., Меркин В.Г. Оценка геомагнитного эффекта при падении Тунгусского метеороида // *Физические процессы в геосферах: их проявления и взаимодействие (геофизика сильных возмущений)*: Сб. научн. тр. ИДГ РАН. М.: 1999. С. 324–339.
- Шувалов В.В. Динамические процессы в атмосфере, вызванные сильными импульсными возмущениями: Диссертация на соискание ученой степени доктора физ.-мат. наук. М.: Ин-т динамики геосфер РАН, 1999. С. 228.
- Boslough M.B., Crawford D.A. Shoemaker-Levy 9 and plume forming collisions on Earth // *Near Earth Objects* / Ed. Remo J.L. *Annals of New York Acad. Sci.* V. 822. New York, 1997. P. 236–282.
- 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>).

Nemtchinov I.V., Loseva T.V. Atmospheric oscillations initiated by the penetration of a comet or an asteroid into gaseous envelope of a planet // LPSC XXY. 1994. Houston. TX. P. 987–988.

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