министерство природных ресурсов и экологии ...

РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА ПО ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ И МОНИТОРИНГУ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ "ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ ГЕОФИЗИКИ ИМЕНИ АКАДЕМИКА Е. К. ФЕДОРОВА"

ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ПРИ ВЗРЫВЕ ЧЕЛЯБИНСКОГО (ЧЕБАРКУЛЬСКОГО) МЕТЕОРОИДА 15.02.2013 г.

Геофизические условия при взрыве Челябинского (Чебаркульского) метеороида 15.02.2013 г. /Алпатов В.В., Буров В.А., Вагин Ю.П., Галкин К.А., Глухов Я.В., Давиденко Д.В., Зубачев Д.С., Иванов В.Н., Кархов А.Н., Коломин М.В., Коршунов В.А., Лапшин В.Б., Лещенко Л.Н., Лысенко Д.А., Минлигареев В.Т., Морозова М.А., Перминова Е.С., Портнягин Ю.И., Русаков Ю.С., Сталь Н.Л., Сыроешкин А.В., Тертышников А.В., Тулинов Г.Ф., Чичаева М.А., Чудновский В.С., Штырков А. Ю. – М.: ФГБУ «ИПГ», 2013, 37 с., 31 рис.

Проанализированы геофизические условия, наблюдавшиеся при падении Челябинского (Чебаркульского) метеороида.

В результате обработки данных наблюдений за падением и взрывом Челябинского метеороида с помощью различных технических средств выявлены: увеличение концентрации водяного пара на высотах 700 км, подтвержденные различными видами наблюдений (спутниковые наблюдения: в канале поглощения водяного пара (6.8 мкм); с помощью радиочастотного масс-спектрометра); инфразвуковые волны; небольшие возмущения ионосферной задержки сигналов ГНСС ГЛОНАСС/GPS над регионом взрыва метеороида; аномальные изменения характеристик позиционирования наземного навигационного приемника, соответствующие по времени добегания поверхностной волны Релея от эпицентра ударной волны взрыва; узкие пучки возмущений на вертикальных разрезах ионосферы над европейской территорией России через несколько часов после взрыва; эффект проседания ионосферы через несколько часов после взрыва метеороида на значительных расстояниях от взрыва метеороида; устойчивое аэрозольное облако на высотах 34-38 км, которое наблюдалось в течении более двух недель после взрыва метеороида; потоки тяжелых заряженных частиц с характеристиками отличными от фона, за 1-3 часа до падения метеороида; существенное увеличение вариаций ионосферной задержки в характеристиках сигналов Глобальных навигационных спутниковых систем над г. Екатеринбург после взрыва метеороида; Форбуш-подобное понижение плотности нейтронного потока.

Содержание

	Введение	4
1.	Наблюдения в видимом диапазоне	5
2.	Наблюдения в инфракрасном диапазоне	6
3.	Инфразвуковые наблюдения	7
4.	Результаты зондирования ионосферы	11
	4.1 Состояние ионосферы по данным наземных ионозондов	11
	4.2 Радиотомографические разрезы ионосферы	13
	4.3 Результаты зондирование возмущений ионосферы по сигналам ГНСС ГЛОНАСС/GPS над Екатеринбургом4.4 Аномалии в рассчитанных результатах позиционирования приемника сигналов ГНСС ГЛОНАСС/GPS	14 17
5.	Лидарное зондирование атмосферы	20
	5.1 Лидарное зондирование атмосферы над г. Москва	20
	5.2 Лидарное зондирование в Калужской области	23
6.	Радиочастотный масс-спектрометрический анализ ионов на орбите KA «Метеор-М» № 1	25
7.	Измерения характеристик тяжелых заряженных частиц с КА «ГЛОНАСС-М»	26
8.	Сейсмические наблюдения	28
9.	Гелиогеофизическая и радиационная обстановка	30
	9.1 Гелиогеофизическая обстановка	30
	9.2 Данные с постов радиационного мониторинга	30
	9.3 Поток вторичных космических лучей	30
10.	Интенсивность метеорных потоков, регистрируемых радиолока- ционными станциями УКВ-диапазона	31
11.	Космическая пыль как предиктор вторжения небесных тел в атмосферу Земли	33
	Заключение	34
	Литература	36

Введение

Ежесуточно на землю падает более 100 небесных тел, а в год — более 30 тысяч. Из них фиксируется всего 10 – 20. Европейские страховые компании для коррекции страховых рисков учитывают максимумы почти сотни метеорных потоков, фиксируемых в течение года [1]. Резонансные события с крупным ущербом от падений крупных космических объектов типа Челябинского (Чебаркульского) метеороида 15.02.2013 фиксируются примерно раз в 10-30 лет.





По различным оценкам (РАН, Роскосмоса, Минобороны России, Росгидромета, NASA, Международной системы мониторинга (МСМ) ядерных испытаний (Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty Organization) и др.) масса Челябинского метеороида при входе в атмосферу оценивалась до 11000 т, при диаметре 17-18 м и плотности 3,6 г/см 3 . Мощность взрыва составила по разным оценкам $20 \div 500$ кт, скорость входа в атмосферу $13,4 \div 19,6$ км/с, высота разрушения 32,5-46,7 км. Высота высвобождения основной энергии составила $5 \div 15$ км, через 32,5 с после вхождения в атмосферу 15.02.2013 г. в 03:20:33 по мировому времени (UTC) с координатами $54,8^{\circ}$ с.ш., $61,1^{\circ}$ в.д. (местное время = UTC+6).

16.10.2013 г. из озера Чебаркуль был поднят самый крупный осколок метеороида в 570 кг [2].

Сразу после падения предполагалось, что это был каменный метео-

рит, обыкновенный хондрит с примесью металлического железа, оливина и сульфитов.

При относительно небольшом диаметре и высокой скорости различными оперативными службами был зафиксирован только факт прохождения небесного тела.



1. Наблюдения из космоса в видимом диапазоне

В видимом диапазоне был зафиксирован след прохождения метеороида космическими аппаратами MTSAT-2, Метеосат-9, Метеосат-10, FY-2D и др. Стратосферная компонента следа метеороида отмечалась в течение 9 часов (рис. 1, 2).

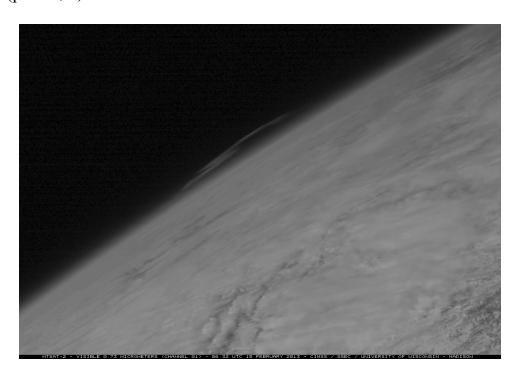


Рис. 1. Изображение атмосферного следа метеороида в видимом диапазоне (0,73 мкм) со спутника MTSAT-2 в 06.32 UTC 15.02.2013 [3]

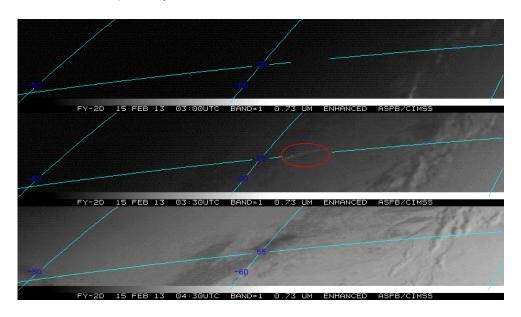


Рис. 2. Изображение следа метеороида в видимом диапазоне (0,73 мкм) со спутника FY-2D в 03.30 UTC 15.02.2013 [3]

Траектория полета метеороида проходила почти строго с востока на

запад к югу от городской черты г. Челябинска.

2. Наблюдения в инфракрасном диапазоне

Метеороидный след был обнаружен также в момент вхождения в атмосферу (03.30 UTC) в ближнем инфракрасном канале и в канале поглощения водяного пара (рис. 3-4)

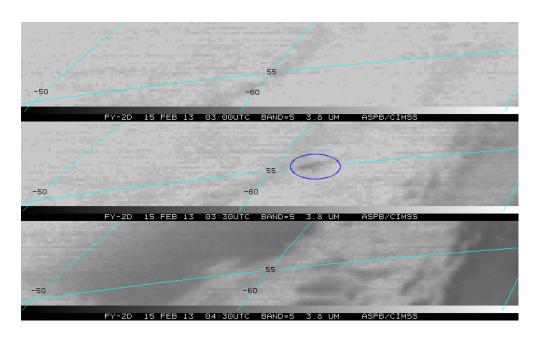


Рис. 3. Изображение следа метеороида в ближнем инфракрасном диапазоне (3,8 мкм) со спутника FY-2D в 03.30 UTC 15.02.2013 [3]

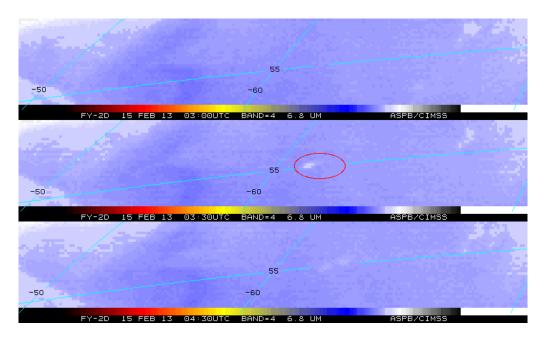


Рис. 4. Изображение следа метеороида в канале поглощения водяного пара (6.8 мкм) со спутника FY-2D в 03.30 UTC 15.02.2013 [3]

3. Инфразвуковые наблюдения

В оперативном режиме информация о взрыве метеороида поступила с 11 инфразвуковых станций Международной системы мониторинга ядерных испытаний (МСМ) мощностью более 1 кт. Затем сигнал от взрыва метеороида был выявлен по данным ещё 6 инфразвуковых станций (рис. 5).

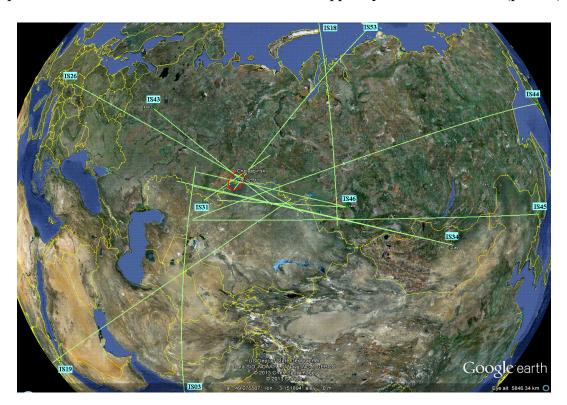


Рис. 5. Карта оперативного пеленга инфразвукового сигнала от Челябинского метеороида на 11 станциях МСМ

Наиболее близкая станция МСМ, зарегистрировавшая сигнал, находилась в г. Актюбинске (на расстоянии около 600 км от источника инфразвука), наиболее удалённая (15000 км) – в Антарктиде. Регистрация инфразвуковых волн (с частотами менее 10 Гц) от взрыва метеороида оказалась крупнейшим событием за всю историю МСМ.

Признаки падения метеороида были также зафиксированы на экспериментальной станции инфразвукового мониторинга Росгидромета (НПО "Тайфун", г. Обнинск), которая имеет 7 датчиков атмосферного давления, оснащенных фильтрами ветровых помех.

Инфразвуковые волны, порождённые болидом, испытав многократные отражения и преломления в верхней атмосфере и преодолев расстояние в 1580 км, достигли к 5:09 UTC станцию в г. Обнинске, Средняя по трассе скорость поступления сигнала составила около 250 м/с.

На рис. 6 представлены пульсации приземного атмосферного давле-

ния в трёх пунктах (а), результаты выделения инфразвукового сигнала (б) и оценки параметров прихода инфразвуковых волн (в).

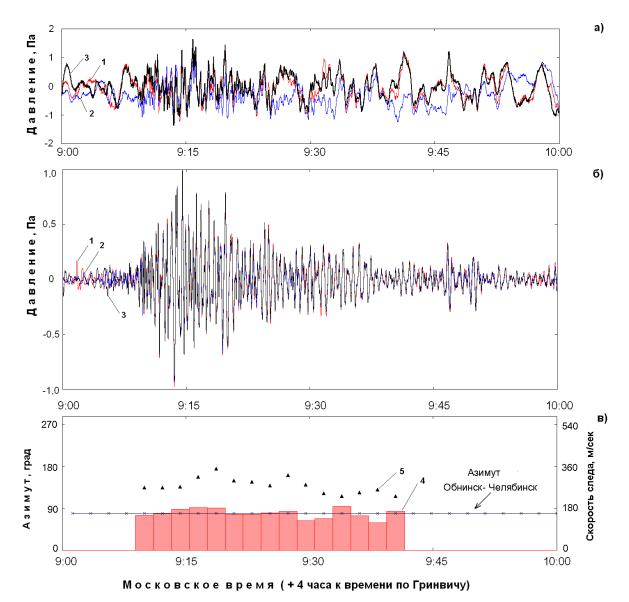


Рис. 6. Регистрация и основные параметры инфразвукового сигнала от Челябинского метеороида в г. Обнинске 15 февраля 2013 г.:

- а) эволюция пульсаций приземного атмосферного давления в трёх пунктах по данным микробарометров: 1, 2, 3 в период наблюдения сигнала;
- б) реализации пульсаций давления после их фильтрации и взаимной фазировки в полосе частот от $0.15~\Gamma\mu$ до $0.015~\Gamma\mu$;
- в) оценка азимута прихода инфразвуковых волн (4) и скорости их следа (5)

Инфразвуковой сигнал заметен даже в необработанных данных по повышенной амплитуде сигнала, его высокочастотному заполнению и синхронизации реализаций у идентичных микробарометров (рисунок 6а, кривые 1, 3).

На рис. 6б представлены реализации, полученные после фильтрации данных микробарометров в полосе частот от 0,015 Гц до 0,15 Гц и после-

дующего фазирования. Сигнал проявился отчётливо в виде резко возросшей амплитуды пульсаций давления.

Оценка параметров сигнала на основе спектрально-когерентного анализа данных позволила автоматически выделить инфразвуковую волну и оценить её параметры: азимут прихода волны и скорость её следа. Эволюция этих параметров представлена на рис. 6в с разрешением по времени 4 минуты. Видно, что азимут прихода сигнала (4) примерно совпадает с направлением из Обнинска на Челябинск. Скорость следа волны (5) немного меньше скорости звука и заметно флуктуирует, что обусловлено малой апертурой инфразвуковой группы по отношению к регистрируемым длинам инфразвуковых волн и наличием шумовых помех.

Обращает на себя внимание необычная продолжительность сигнала (примерно 30 минут), что может быть объяснено протяжённостью пологой трассы излучения инфразвукового сигнала в атмосфере (в направлении восток — запад около 500 км) и многолучевым характером его распространения.

На рис. 7 показана оценка энергетического спектра инфразвукового сигнала в сопоставлении с фоновыми спектрами пульсаций приземного атмосферного давления в моменты времени до и после поступления сигнала от метеороида. Спектр сигнала 1 был рассчитан путём вычитания из спектра пульсаций давления в период поступления сигнала среднеарифметического спектра, рассчитанного на основании четырёх фоновых спектров 2-5, представленных на рис. 7.

Несмотря на некоторую неопределённость формы спектра сигнала в низкочастотной области, когда энергия сигнала становилась соизмеримой с фоновой энергией пульсаций давления, из рис. 7 следует, что основная доля энергии сигнала приходиться на частоты $\omega_0 \approx 0,027$ Гц. Из рис. 7 видно также, что наилучшим образом сигнал выделялся в области частот от 0,12 Гц до 0,04 Гц, когда его энергия более чем в 100 раз превышала энергию шумовых помех.

Классический метод предварительной оценки кинетической энергии метеороида по инфразвуковым данным, по аналогии с химическими взрывами, основан на использовании эмпирического соотношения между периодом наиболее интенсивного инфразвукового колебания и величиной тротилового эквивалента [4, 5].

Применение данного метода обусловлено тем, что период наиболее низкочастотных колебаний, в отличие от их амплитуды, почти не зависит ни от расстояния до источника инфразвука, ни от его высотного расположения и температурно-ветровой стратификации по трассе источник — приёмник инфразвука. Методика предложена Американским техническим центром поддержки военно-воздушных сил (US Air Force Technical Applications Centre - AFTAC) по результатам многочисленных испытаний химических и ядерных зарядов.

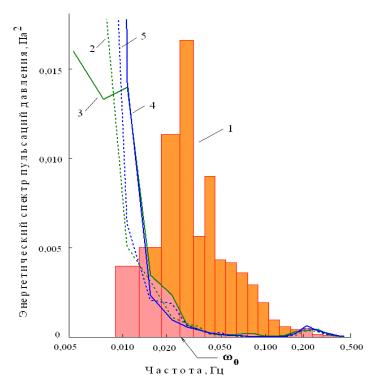


Рис. 7. Спектр инфразвуковых пульсаций давления от Челябинского метеороида (1) и фоновые спектры пульсаций приземного атмосферного давления (2-5) для различных периодов времени.

1 — спектр инфразвукового сигнала от метеороида за период времени с 9:09 до 9:39 МСК; 2 и 3 — фоновые 20-ти минутные спектры за 40 минут и 20 минут до прихода инфразвукового сигнала соответственно; 4 и 5 — фоновые 20-ти минутные спектры спустя 20 минут и 40 минут после завершения прихода сигнала соответственно; ω_0 — частота, соответствующая максимальной амплитуде колебаний.

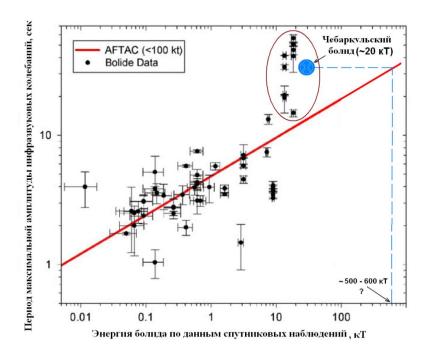


Рис. 8. Оценки энергии Челябинского метеороида на основе данных статистических наблюдений [4] и модели AFTAC

На рис. 8 представлен график эмпирической зависимости, построенный по данным оптических спутниковых наблюдений и отражающий энергии зарегистрированных в предыдущие десятилетия метеоритов. На рисунке нанесена метка Челябинского метеороида, ордината которого равна измеренному значению $1/\omega_0$.

Если модель AFTAC адекватна, то энергия взрыва Челябинского метеорита оценивается в пределах 500 – 600 кт, что соответствует первым заявлениям NASA. Но экспериментальные данные [5] демонстрируют, что модель, подобная AFTAC, плохо работает в случае наблюдения больших периодов инфразвуковой волны от метеоритов.

В [5] предполагается, что в таких случаях имеет место иной механизм генерации инфразвука метеороидом из-за егофрагментации и формирования значительной зоны излучения инфразвука. Однако возможны и иные объяснения этого феномена, например, связанные с возбуждением в ионосфере ударных волн в результате пролёта и/или взрыва метеороида, подобных инфразвуковым волнам, возникающим во время магнитных бурь. Именно такие волны имеют характерный период ~30 – 60 секунд [4].

Если расположить метку Челябинского метеороида на рис. 8 по оси абсцисс в компактной области, в которой уже находятся метки, относящиеся к наблюдавшимся раньше метеоритам, генерирующим подобную инфразвуковую волну с характерным периодом около 30 — 40 секунд, то оценка кинетической энергии Челябинского метеороида составит порядка 20 кТ.

Дополнительные оценки, полученные специалистами НПО «Тайфун» с учётом зафиксированной максимальной амплитуды инфразвукового сигнала, скорости и направления ветра по трассе Челябинск — Обнинск, показали, что его энергия составила от 30 до 40 кТ.

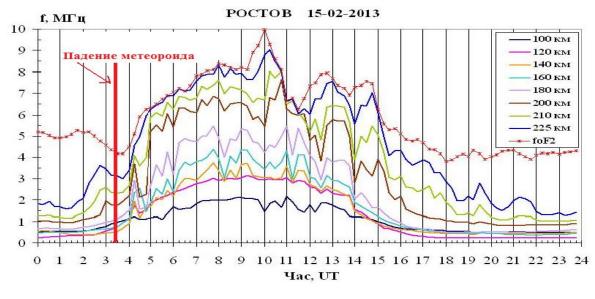
4. Результаты зондирования ионосферы

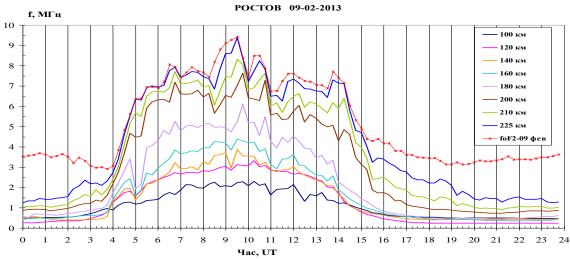
4.1 Состояние ионосферы по данным наземных ионозондов

Эффекты взрыва метеороида диагностировались по данным наземных сетевых ионозондов Росгидромета. При этом, в данных вертикального радиозондирования на ионосферной станции Ростов не было выявлено существенного влияния взрыва Челябинского метеороида на область F2 ионосферы (рис. 9).

По полученным оценкам возмущение ионосферы от взрыва метеороида происходило почти вдоль параллели (Челябинск — Москва) со скоростью $230 \div 430$ км/час и в юго-западном направлении (Челябинск — Ростов) со скоростью $300 \div 550$ км/час.

Накануне и в день падения значение индекса Кр не превышало 3 и 2, соответственно.





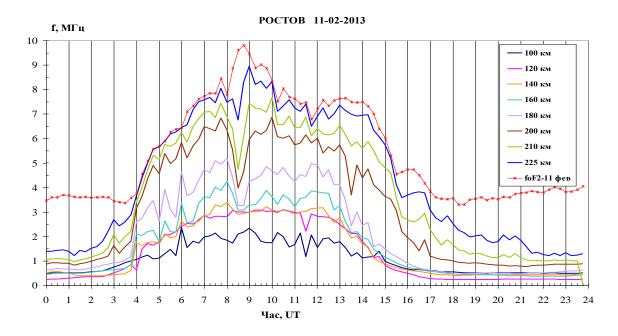
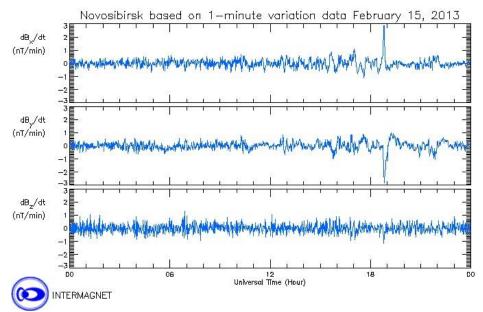


Рис. 9. Изменение плазменных частот ионосферы над Ростовом

Вариации вектора магнитной индукции на станции «Новосибирск» системы Intermagnet (рис. 10) были незначительными.



Puc. 10. Изменение магнитной индукции на станции «Новосибирск» 15/02/2013 по данным Intermagnet (http://www.intermagnet.org/apps/plt/dataplot_e.php?plot_type=db_plot)

4.2. Радиотомографические разрезы ионосферы

Метод радиотомографии ионосферы впервые был использован для диагностики эффектов прохождения метеороида в атмосфере.

На рис. 10 показаны восстановленные разрезы ионосферы 14 и 15 февраля 2013 г. в регионе, охватывающем $40^\circ-72^\circ$ с.ш. и $36^\circ-47^\circ$ в.д., и временном интервале 04.23-07.10 UTC.

Заметных возмущений электронной концентрации — изолиний равных значениям N_e на высотах максимума слоя F2 не проявилось.

Для восстановления профиля использована одинаковая цепочка станций во временном интервале $06.39 \div 07.10$ UTC 15.02.2013 г. – почти через 3 часа после взрыва метеороида).

На фоне относительно плавного хода изолиний Ne, связанного с их широтными вариациями, в диапазоне широт 51° - 57° с.ш. в модельных расчетах разрезов ионосферы проявились модуляции с длиной волны, примерно равной $1,2^{\circ}$ по широте.

Не исключено, что время наблюдения этих модуляций совпало с началом возмущений в действующей высоте слоя F2 – hrF2. Так как регулярный ход изолиний N_e нарушался в ограниченное время в ограниченном широтно-долготном диапазоне, можно предположить, что возмущение в ионосфере, связанное с вторжением метеороида, распространялось в виде волн, имевших вид узких, постепенно расширяющихся к западу пучков в телесном угле, составлявшем $15^{\circ}-17^{\circ}$. Направление их перемещения соот-

ветствовало продолжению траектории движения метеороида до момента его взрыва.

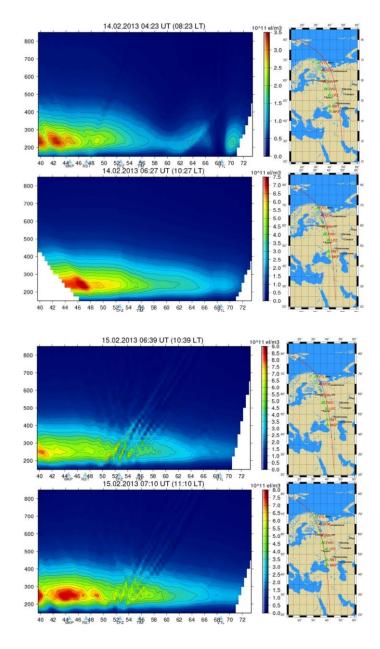


Рис. 11. Восстановленные разрезы ионосферы 14 и 15.02.2013 г.

4.3. Результаты зондирования возмущений ионосферы по сигналам ГНСС ГЛОНАСС/GPS над Екатеринбургом

Представления о морфологии возмущений ионосферы связаны с конусом ударных волн, формируемых метеороидом и его взрывом. Изначально возмущения ионосферы были сгенерированы при входе в нее метеороида.

При взрыве метеороида произошло генерирование ударной волны, добегание которой через 2-3 минуты до Е-слоя ионосферы инициировало

ее отклик, а добегание до земной поверхности сгенерировало поверхностную волну Релея. Возмущения Е-слоя ионосферы распространяются со скоростью 600-800 м/с. Их проявление, скорее всего, было зашумлено эффектами суперпозиции добегающих возмущений ионосферы, инициированных при входе метеороида в верхнюю ионосферу.

Поэтому для диагностики эффектов взрыва метеороида в ионосферных задержках сигналов ГНСС можно ограничиться временным отрезком в первые десятки минут и обратить внимание только на аномальные всплески в рассчитанных значениях ПЭС через несколько минут после взрыва.

Наиболее близко к месту взрыва метеороида находился приемник сигналов ГНСС ГЛОНАСС/GPS в г. Екатеринбурге, примерно в 200 км от Челябинска. Он входит в сеть навигационных приемников ООО «Навгеоком».

Дешифрированные по технологии [6] результаты изменения относительных значений полного электронного содержания (ПЭС), рассчитанного в вертикальном столбе атмосферы по видимому созвездию навигационных космических аппаратов глобальной навигационной системы (ГНСС) GPS с маской 10 градусов, представлены на рис. 12.

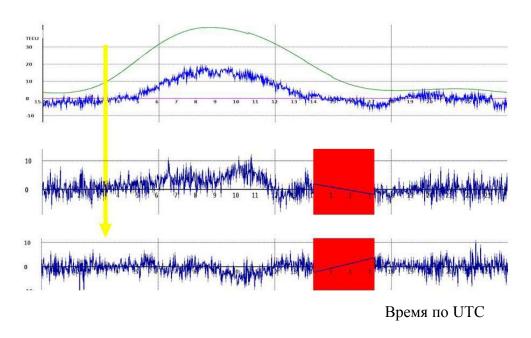


Рис. 12. Изменение полного электронного содержания в атмосфере над Екатеринбургом 15.02.2013 г. (верхний фрагмент). Зеленая линия – расчеты ПЭС по модели IRI. Синяя кривая – относительное ПЭС по данным с навигационного приемника. Средний фрагмент – разность между значениями ПЭС 14-15.02.2013 г. Нижний фрагмент – разность между значениями ПЭС 13-14.02.2013 г. Красным цветом выделены сбои в работе приемника 14.02.2013 г.

Данные об ионосферных задержках сигналов ГНСС и рассчитанных

характеристиках позиционирования приемника имели дискретность измерений в одну минуту.

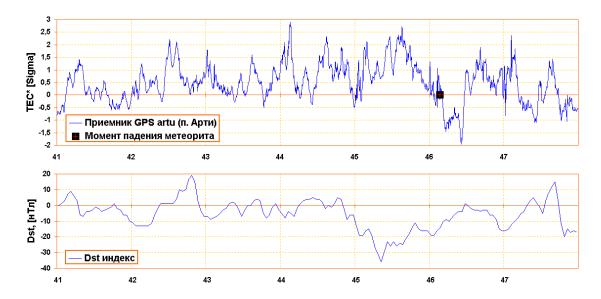


Рис. 13. Изменение нормированных отклонений ПЭС в единицах СКО над станцией ARTU в течение нескольких суток от момента падения метеороида в 46 сутки = 15.02.2013 г. На нижнем фрагменте представлены сопутствующие изменения Dst-индекса.

Различная возмущенность магнитного поля (15.02.2013 г. магнитное поле Земли было спокойным, а накануне слабо возмущенным), возможно, проявилась и в повышенных вариациях ПЭС в сутки взрыва метеороида.

Для станции Геофизической службы РАН «ARTU», расположенной на западном склоне Уральского хребта в 135 км к юго-западу от г. Екатеринбурга, на базе Артинской сейсмической обсерватории, результаты расчетов изменения отклонений ПЭС в единицах среднеквадратического отклонения, рассчитанного по предыдущим 15 суткам для измерений в тот же момент времени представлены на рис. 13.

В полуденные часы достаточно очевиден эффект регионального обеднения (уменьшения электронной концентрации) ионосферы после взрыва. Об обеднении ионосферы свидетельствуют также тенденции изменения разностей ПЭС на рис. 11 для момента 10-11 UT 14-15.02.2013 г. по сравнению с 13-14.02.2013 г. Разность вариаций ПЭС на рис. 18 между значениями 14-15.02.2013 г. по сравнению с 13-14.02.2013 г. возросла вдвое на отрезке времени с 6 утра до полудня.

Аномальные уменьшения ПЭС с уровнем случайности по критерию Стьюдента менее 5 % для анализируемого интервала времени приходятся на 8-ю и 25-ю минуты после взрыва. Аномальное увеличение ПЭС начинается через 33 минуты после взрыва.

Малая амплитуда вариаций ПЭС (рис. 14) обусловливает исследования спектрально-временных характеристик рассчитанных рядов.

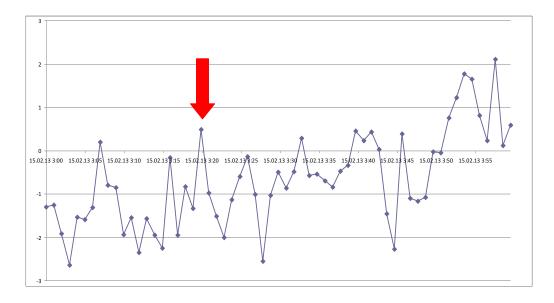


Рис. 14. Относительное изменение ПЭС над Екатеринбургом 15.02.2013 г. в интервале \pm 30 минут от момента (красная стрелка) взрыва метеороида

С помощью быстрого преобразования Фурье со скользящим окном в 64 минуты был рассчитан набор амплитудограмм, который представлен в виде нормированных спектрально-временных диаграмм (СВАН-диаграммы). Для диагностики аномальных эффектов методом сравнения, из СВАН-диаграммы за 15.02.2013 г. были последовательно вычтены СВАН-диаграммы за предыдущие сутки. Рассчитанные значения каждого периода на СВАН-диаграммах нормировались по минимаксу амплитуд за исследуемый отрезок времени.

Полученные разности представлены на рис. 15.

Максимальные значения амплитуд выделены красным цветом, минимальные – синим.

На рис. 14 можно отметить повышенную амплитуду вариаций перед взрывом метеороида в диапазоне периодов 12, 15-19 и 23-25 минут за 40-70 минут до взрыва. Уменьшение амплитуд отмечается для периодов 19-22 минуты. После взрыва можно отметить повышенную амплитуду для периода в 20 минут и 28-30 минут. Если бы не близость по времени эффекта прохождения терминатора, эффекты взрыва метеороида могли бы быть четче.

4.4. Аномалии в рассчитанных результатах позиционирования приемника сигналов ГНСС ГЛОНАСС/GPS

Интересный результат в исследовании эффектов взрыва Чебаркульского метеороида связан с диагностикой изменений рассчитываемых приемниками сигналов ГНСС ГЛОНАСС/GPS характеристик позиционирования в Екатеринбурге и Тюмени.

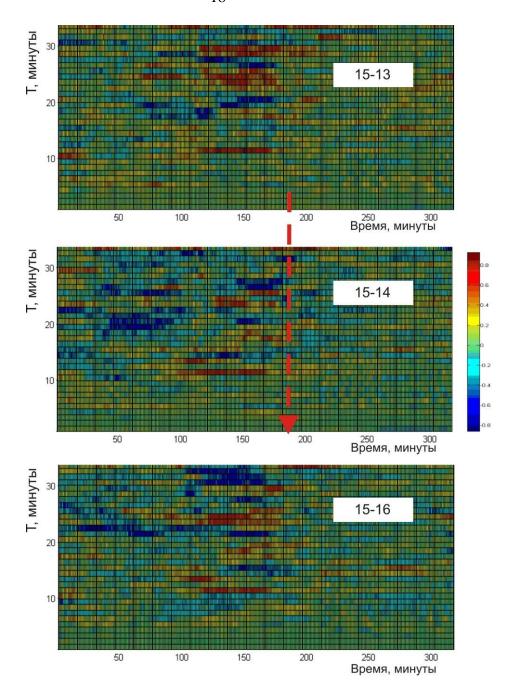


Рис. 15. Разности нормированных спектрально-временных диаграмм вариаций ПЭС над Екатеринбургом относительно данных за 15.02.2013 г. Взрыв метеороида (стрелка) на 193 минуте.

На рис. 16 представлены аномальные изменения выдаваемых приемником оценок широты и долготы в Екатеринбурге 15.02.2013 г.

Для 30-й минуты после падения метеороида суммарные изменения достигли 16 метров, что не проявлялось сутками ранее и сутками позже и выходит за границы 99% доверительного интервала, рассчитанного с учетом суточного хода характеристик позиционирования в анализируемом отрезке времени с использованием известных критериев параметрической и непараметрической статистики.

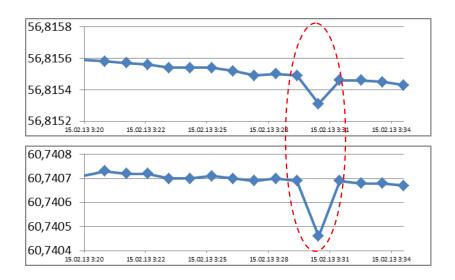


Рис. 16. Изменение рассчитанной навигационным приемником в Екатеринбурге широты (верхний фрагмент) и долготы 15.02.2013 г.

Эти результаты не объяснимы возмущениями ионосферы рис. 14-15. Задержка проявления обнаруженных аномальных изменений позиционирования (кажущихся «геодвижений») немного отстает от времени добегания ударной волны от взрыва метеороида до земной поверхности и далее от эпицентра в виде инициированной сейсмической волны (поверхностной волны Релея) с соответствующим откликом в ионосфере. На вариации позиционирования могли повлиять произошедшие сейсмические события.

Для диагностики направлений распространения эффектов взрыва дополнительно были проанализированы характеристики позиционирования сетевого приемника ООО «Навгеоком» в г. Тюмень (около 350 км от Челябинска). На рис. 17 представлены дешифрированные данные по изменению выдаваемой приемником широты и долготы в г. Тюмени 15.02.2013 г.

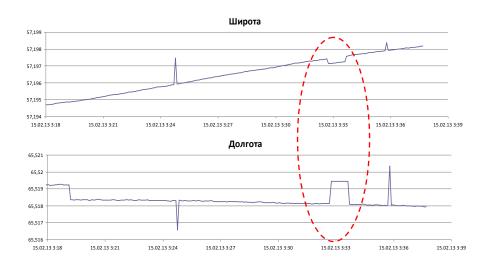


Рис. 17. Изменение оценок широты и долготы навигационного приемника в Тюмени 15.02.2013 г. после взрыва метеороида

На этих графиках некоторые изменения в позиционировании приемника приходятся на 32 минуту после взрыва, что при сравнении с данными по Екатеринбургу предполагает распространение возмущений, вытянутых в широтном направлении, то есть вдоль траектории движения метеороида.

5. Лидарное зондирование атмосферы

5.1. Лидарное зондирование атмосферы над г. Москва

В Институте прикладной геофизики имени академика Е.К.Федорова (ФГБУ «ИПГ») проводятся исследования и мониторинг высоких слоев атмосферы методом лидарного зондирования. Методами рамановского и релеевского рассеяния определяются вертикальные профили температуры на высотах 4-80 км. На высотах 12-30 км регистрируются профили концентрации озона и стратосферного аэрозоля. Выше этого уровня, как показывает опыт, могут обнаруживаться аэрозольные облака аномального происхождения. Зондирование проводится на 3-х длинах волн (532 нм, 355 и 308 нм) в ночных условиях и при ясной погоде.

По результатам зондирования 14.02.2013 г. не было выявлено заметных следов аэрозольных высыпаний на высотах 30-45 км (рис. 18).

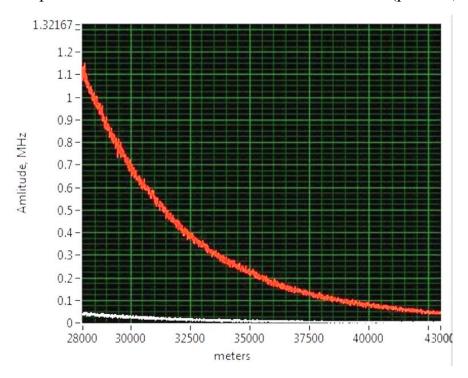


Рис. 18. Высотный профиль отношения обратного рассеяния 14.02.2013 г. Красным цветом обозначен высокочувствительный канал, белым — низкочувствительный канал.

На следующий день произошло падение метеороида в районе Челябинска, сопровождавшегося его горением в атмосфере (свечение). Во время горения в атмосферу выброшено значительное количество аэрозоля. Перенос и диссипация аэрозолей вокруг Земли преобладающими в это время ветрами осуществляется примерно за 2 дня. Появление достаточно плотных слоев аэрозоля, связанных с шелушением и сгоранием кусков метеороида, ожидалось в районе Москвы 17 – 18 февраля 2013 года.

Х. Зулуага (Jorge Zuluaga) и И. Феррин (Ignacio Ferrin) из колумбийского Института физики (Columbia University) г. Нью-Йорк, основываясь на данных записи видеокамеры на площади Революции в Челябинске, смоделировали траектории метеороида до и после его входа в атмосферу. Тени от столбов, возникшие в момент вспышки болида, позволили им достаточно точно определить высоту и азимут траектории. Они определили, что болид начал светиться на высоте от 32 до 47 км. Точка, из которой он летел, находилась в созвездии Пегаса, а скорость была от 13 до 19 км/с.

В ночь с 21 на 22 февраля 2013 г. наблюдения верхних слоев атмосферы с помощью лидара ФГБУ «ИПГ» показали значительный пик сигнала на высоте примерно 35 км, который, вероятно, связан с прохождением над Москвой аэрозольного облака от следа Челябинского метеороида.

На рис. 19 в высокочувствительном канале хорошо виден пик обратного рассеяния с заметным превышением амплитуды по отношению к уровню релеевского сигнала и толщиной около 300 м.

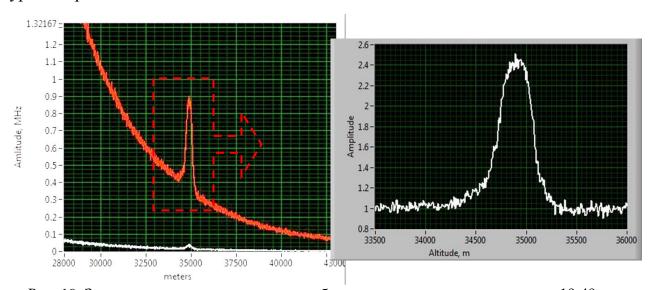


Рис. 19. Зависимость амплитуды сигнала обратного рассеивания от высоты в 19:49 МСК 21/02/13. Снимок с экрана отражает результат суммирования по 2000 импульсам за 67 с. Разрешение по высоте 7,5 м. Справа — увеличенное изображение сигнала.

Зондирование проводилось практически непрерывно в период с 19:49 МСК 21.02.13 до 03:50 МСК 22.02.13 (около 8 часов). Во время паузы с 21:00 до 22:00 часов проводилось часовое зондирование с использованием двухступенчатого рамановского спектрографа. За все время зондирования наблюдался устойчивый сигнал аэрозольного рассеяния с некоторым снижением высоты максимума за 8 часов с 34,9 км до 34,2 км.

Изменение аэрозольного слоя за время зондирования показано на рис. 20.

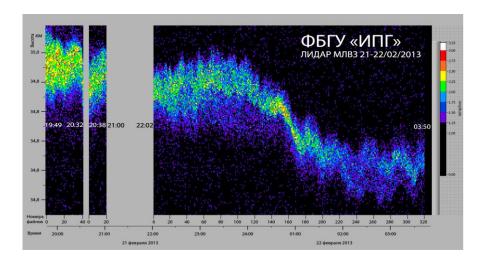


Рис. 20. Наблюдаемый слой аэрозоля при зондировании 21-22 февраля. Внизу шкала показывает номера файлов и время. Разрешение по времени 67 сек (сумма по 2000 импульсов). Высота указана в километрах. Справа показана шкала амплитуды сигнала.

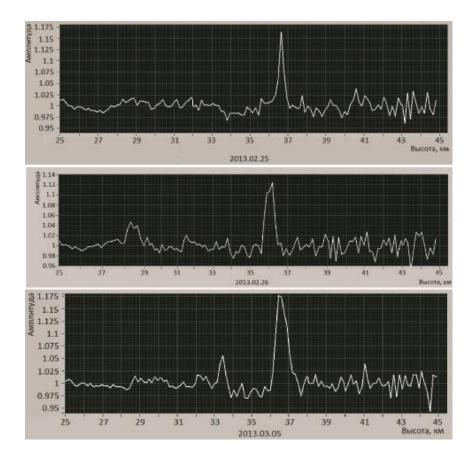


Рис. 21. Высотные профили аэрозольных следов, полученные 25, 26 февраля и 5 марта 2013 года. Шаг по высоте 150 метров.

Хорошо заметны волновые вариации высоты максимума слоя, что может быть связано с турбулентными процессами при горении и шелушении метеороида в атмосфере, а также с возможной генерацией внутренних

гравитационных волн в месте наблюдения. С учетом скорости переноса метеорного следа вокруг Земли, можно предположить, что эффект наблюдался на 3 или 4 витках.

В ходе зондирования 25, 26 февраля и 5 марта были обнаружены аэрозольные пики существенно более низкой амплитуды — 1,16 с высотой 36,6 км, 1,12 с высотой 36,1 км и 1,17 с высотой 36,4 км (рис. 21).

Отсутствие пиков большой амплитуды говорит о локальном расположении метеорного следа в атмосфере, что при его смещении по меридиану не позволило провести повторные наблюдения. Наблюдение малых амплитуд (1,15) сигнала аэрозольного рассеяния было также зафиксировано на лидарной станции в г. Обнинске в НПО «Тайфун» 18.02.2013 г., что подтверждает локальный характер облака, так как расстояние между указанными точками зондирования составляет всего 110 км.

При проверке данных предыдущих зондирований аналогичных пиков обнаружено не было. С учетом соответствия наблюдаемых высот максимума аэрозольного слоя с расчетами X. Зулуага и И. Феррин, наблюдаемые облачные структуры выше 30 км можно связать с Челябинским метеороидом. Возможно, что вместе с главным телом метеороида в атмосферу попали и его более мелкие осколки, следы которых были обнаружены при лидарном зондировании.

5.2. Лидарное зондирование атмосферы в Калужской области

Лидарные измерения стратосферного аэрозоля на лидарной станции г. Обнинск, Калужская обл. проводились по ночам с 18.02 по 11.03 2013 г. (рис. 22).

18 февраля был зафиксирован первый относительно слабый аэрозольный слой на высоте около 42 км.

Отношение обратного рассеяния R на длине волны 532 нм составило в максимуме слоя 1,15. В последующем, начиная с 20 февраля, примерно с 03 часов МСК, слои наблюдались на высотах от 34 до 38 км. С 24 по 26 февраля наблюдались наиболее сильные слои, значительно ослабшие в марте (R < 1,1). Отмечено отсутствие слоя 22 и 23 февраля. По-видимому, распространение аэрозоля происходило в виде струи, которая смещалась вдоль широты.

По данным измерений с разрешением 150 м, толщина слоев по высоте на уровне 0,5R от максимума составляла несколько сот метров. Максимальная зафиксированная величина R в середине слоя достигала уровня 2,8. Степень деполяризации аэрозольного рассеяния d_a менялась по слою и ближе к нижней части слоя достигала величины 0,1. Среднее отношение коэффициентов обратного аэрозольного рассеяния R на длинах волн 355 и 532 нм составило $1,0 \pm 0,1$.

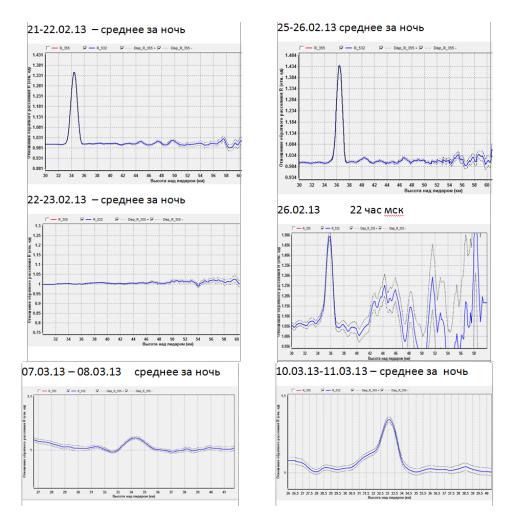


Рис. 22. Развитие аэрозольного слоя на высоте 34-38 км в конце февраля – начале марта 2013 г. над г. Обнинском. По оси абсцисс – высота над лидаром, км; по оси ординат – отношение обратного рассеяния (R) на длине волны 532 нм.

На рис. 23 показана трансформация аэрозольного слоя в течение ночи на примере измерений 24-25 февраля.

В течение ночи происходило изменение, как высоты слоя, так и его интенсивности. Степень деполяризации d_a увеличивалась по направлению к нижней части слоя. Представленную картину можно интерпретировать, как происходящее одновременно оседание аэрозоля и смещение по горизонтали от края к центру струи.

Одно из описаний наблюдений аэрозольного следа от крупного метеорита, произведенное с помощью лидара, приведено в [7]. Результаты измерений в Обнинске и в [7] весьма близки по степени деполяризации и отношению обратного рассеяния.

Полученное в Обнинске отношения коэффициентов обратного рассеяния R на длинах волн 355 и 532 нм, равное 1, также указывает на то, что частицы находятся в диапазоне размеров около 1 мкм.

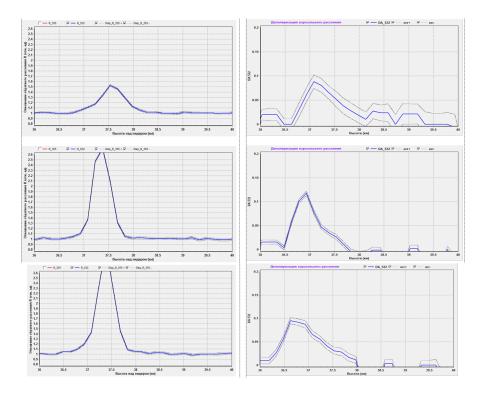


Рис. 23. Трансформация аэрозольного слоя в течение ночи 24-25 февраля 2013 г. над Обнинском. Показана серия последовательных во времени измерений с накоплением 1,5 часа. Слева — отношение обратного рассеяния на долине волны 532 нм, справа — степень деполяризации d_a.

6. Радиочастотный масс-спектрометрический анализ ионов на орбите KA «Метеор-М» № 1

Непрерывный мониторинг ионов проводился на КА "Метеор-М" № 1 на высоте около 830 км с помощью радиочастотного масс-спектрометра РИМС-М, обеспечивающего измерения состава атмосферных ионов в двух массовых диапазонах: 1-4 а.е.м. (ионы атомарного (H^+) и молекулярного водорода (H_2^+), гелия (He^+)) и 5-20 а.е.м. (ионы атомарного азота (N^+) и атомарного кислорода (O^+), паров воды (H_2O^+)).

Данные по ионному составу в зависимости от высоты, географических координат и времени, представлены на рис. 24.

Пологая синусоида описывает высоту полёта, крутая синусоида — широту, кривая с разрывом — долготу.

После падения метеороида в течение 10 суток на спутнике "Метеор-М" № 1 регистрировался повышенный фон ионов воды.

Количество попаданий соответствующих измерений в верхнюю треть диапазона изменений выходного сигнала за каждые сутки после события (нештатное увеличение амплитуды до 2/3 от максимально регистрируемой) с 16.02.2013 по 25.02.2013 включительно составило: 52, 46, 31, 35, 24, 7, 31, 3, 11, 13 у.е.

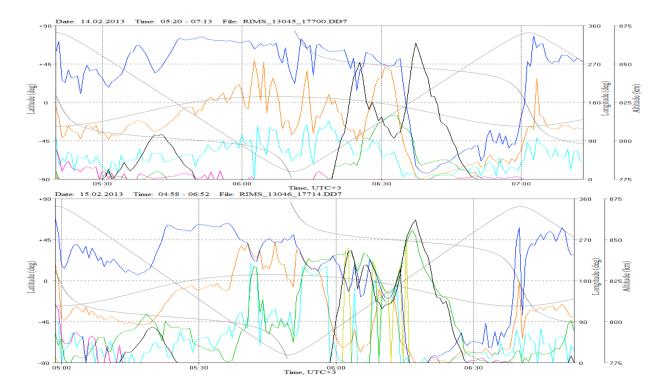


Рис. 24. Вариации ионных компонент 14 и 15 февраля с ИСЗ «Метеор-М» № 1. Цвет кривых: ионы H^+ – чёрный, H_2^+ – жёлтый, He^+ – зелёный, N^+ – малиновый, O^+ синий, H_2O^+ – голубой. Концентрация ионов представлена в условных единицах.

Экспоненциальное уменьшение относительного содержания паров воды на высотах порядка 800 км с последующей релаксацией к невозмущённому состоянию произошло примерно за неделю.

7. Измерения характеристик тяжелых заряженных частиц с KA «ГЛОНАСС-М»

В период 7 — 17.02.2013 г. бортовой аппаратурой «ГЛОНАСС-М» проводился мониторинг потоков тяжелых заряженных частиц (ТЗЧ) космического пространства с Z > 10 (атомные номера более 20). Полученные результаты представлены на рис. 25.

С 7 по 12 февраля общий фон потоков ТЗЧ был в норме. Всего группировкой регистрировалось около 10 частиц за 1 сутки, что соответствует потокам в $0.5 \cdot 10^{-4}$ част./(с·ср·см²) и близко к нормальному фону, регистрируемому в период с 2004 по 2012 гг.

13 и 15 февраля наблюдались «всплески» в потоках частиц на 100% и 30% соответственно. Всплеск 13 февраля, вероятно, был связан с взрывом сверхновой звезды SN2013aa в спиральной галактике NGL5643, находящейся на расстоянии в 42 млн. световых лет. «Всплеск» 15 февраля (30%) возможно связан с приближением метеорного потока.

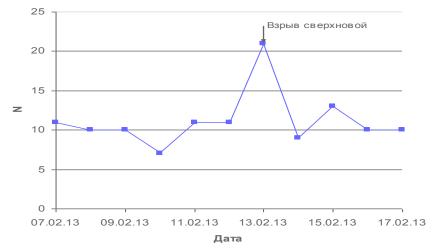


Рис. 25. Временной ход потоков ТЗЧ 7-17 февраля 2013 г.

При изменении ориентация КА по оси крена на витке, система регистрации датчиков провела сканирование различных точек небосвода. Было установлено, что датчики КА, находящихся на 2-й орбите, ориентированы (в указанные периоды времени) на Солнце. Это позволило разделить потоки ТЗЧ, приходящие со стороны Солнца и из других областей космического пространства.

15 февраля, потоки ТЗЧ со стороны звезд не претерпели изменений. Небольшой всплеск потоков заряженных частиц был зарегистрирован со стороны Солнца (рис. 26), однако при этом аномальных изменений в солнечной активности выявлено не было.

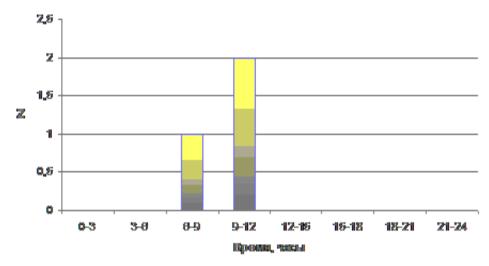


Рис. 26. Распределение частоты регистраций ТЗЧ 15.02.2013 г. со стороны Солнца

Вероятность того, что 15 февраля «всплеск» потоков ТЗЧ, зарегистрированный БА в период между 6 и 12 часами по бортовой шкале времени (БШВ) (2-8 UTC) «ГЛОНАСС» случаен, по оценкам специалистов НПО «Системы прецизионного приборостроения» (ОАО «НПК СПП») составляет 9%.

8. Сейсмические наблюдения

Анализ сейсмических эффектов взрыва метеороида проводился по сейсмограммам со станции Обнинск (1600 км до Челябинска) с учетом того, что в 03:02:22 UTC (примерно за 20 минут до взрыва) произошло землетрясение на островах Тонга (глубина очага 70 км). Волны от него пришли на сейсмостанцию примерно в тоже время, что и от взрыва. Задержка прихода р-волн на станцию «Обнинск» для взрыва метеороида над Челябинском оценена в 200 с, а для землетрясения у о. Тонга в 1156 с. Для ѕволн соответственно 357 с и 1579 с.

Для выделения вступления сигнала от разных типов волн была выполнена частотная фильтрация.

На рис. 27 представлена статистика по методу χ^2 (построенная определенным образом функция от наблюдений, позволяющая определить наличие полезного сигнала) данного детектора и вертикальная компонента сигнала (красной чертой помечено время вступления р-волны от взрыва метеороида).

Всплески детектора в начале записи можно объяснить кодами от первой р-волны.

По расчетам, s-волна от взрыва метеороида должна была поступить в 03:28:04 UTC, в то же время s-волна от землетрясения – в 03:28:20 UTC.

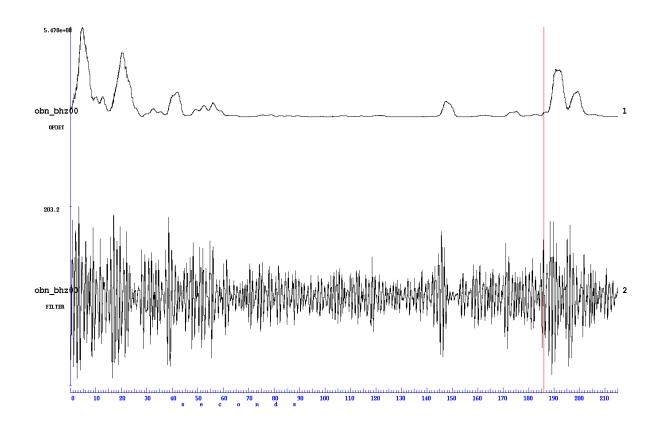


Рис. 27. Результаты обработки сигналов на станции «Обнинск» по методу χ^2

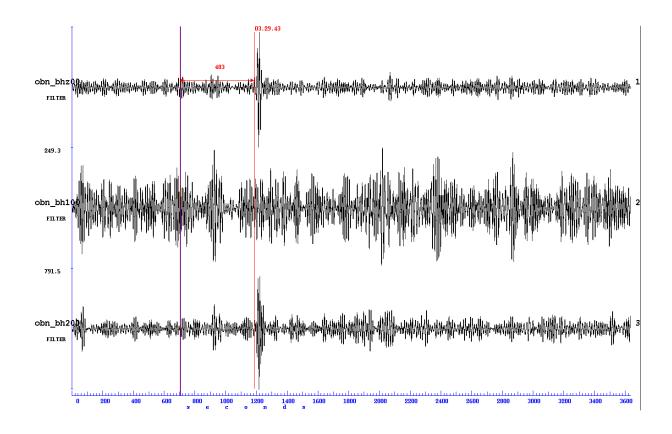


Рис. 28. Сейсмограммы, отфильтрованные в полосе 0,05-0,1 Гц на станции «Обнинск»

Учитывая погрешность при определении времен, разделить волны от разных событий практически невозможно.

Наилучшим образом удалось выделить поверхностную волну от взрыва метеороида. Для этого была проведена фильтрация в полосе 0,05 — 0,1 Гц (рис. 28). Красной линией отмечено вступление поверхностной волны, а также указано время пробега волны.

При этом отчетливо выделяется сигнал, соответствующий волне Релея. Учитывая, что волна Релея является поверхностной волной, можно легко рассчитать ее скорость (поделив расстояние до Челябинска на время пробега). V = 1600/483 = 3,3 км/с. Учитывая погрешность определения точного расстояния до места взрыва, данная скорость хорошо согласуется со скоростью поверхностных волн.

Таким образом, сигнал от надземного взрыва метеороида отличается от сигнала землетрясения относительно слабыми р- и s-волнами и сильной поверхностной волной.

Скорее всего, это связано с тем, что высотный взрыв влияет лишь на поверхность земли и не может вызвать значительных объемных волн (какими являются р- и s-волны). Также этим можно объяснить небольшую амплитуду р-волны: р-волна является продольной волной, а взрыв воздействовал на Землю сверху.

9. Гелиогеофизическая и радиационная обстановка

9.1. Гелиогеофизическая обстановка

По данным Института прикладной геофизики им. Е.К. Федорова, гелиогеофизическая обстановка 14-15.02.2013 г. была спокойной [10]. Вспышечная активность очень низкая, зарегистрирован рентгеновский всплеск «В» – класса. Вторжений высокоэнергичных протонов не было.

Возмущений космической погоды (вторжение потоков заряженных частиц, ионосферных и магнитных возмущений) на территории Российской Федерации национальными наблюдательными средствами не регистрировалось. Это относится к данным ИСЗ «Электро-Л», «Метеор-М», сети магнитометров и станций ионосферного зондирования. Мировая сеть мониторинга космической погоды (США, Канада, Япония, Австралия, ЕС) также не зарегистрировало каких либо возмущений в солнечной атмосфере, межпланетной среде и околоземном космическом пространстве. Отклонений от фоновых значений наземной радиационной обстановке также не зафиксировано.

9.2. Данные с постов радиационного мониторинга

По данным ежечасных наблюдений 28 постов радиационного мониторинга Росгидромета по Свердловской, Тюменской и Челябинской областям радиационная обстановка на 04.00 МСК 16 февраля (почти через сутки после падения метеороида) была нормальная и не превышала фоновых и допустимых значений по мощности экспозиционной дозы (МЭД) гаммаизлучения (25 мкР/ч). Значения МЭД в основном варьировалась в течение 15 февраля в пределах среднемноголетних значений по территории Свердловской области (фоновые значения по территории ее территории составляют 10-15 мкР/ч). Максимальные значения МЭД наблюдались на станции Тавда и составили 15-17 мкР/ч, что не превышало максимальных значений МЭД, отмеченных в декабре 2012 г.

По данным единой государственной системы контроля радиационной обстановки на территории Российской Федерации (ЕГАСКРО) радиационная обстановка в Западной Сибири 15-16 февраля находилась в пределах нормы — МЭД в пределах от 0,07 до 0,15 мкЗв/ч (7-15 мкР/ч) [9].

9.3. Поток вторичных космических лучей

Нейтронный монитор в г. Троицк («MOSC», система NMDB, www.nmdb.eu) с 03-00 14.02.2013 г. до 06-00 15.02.2013 г. продемонстрировал длительное снижение плотности потока вторичных космических лучей (рис. 29), подобное Форбуш-понижению.

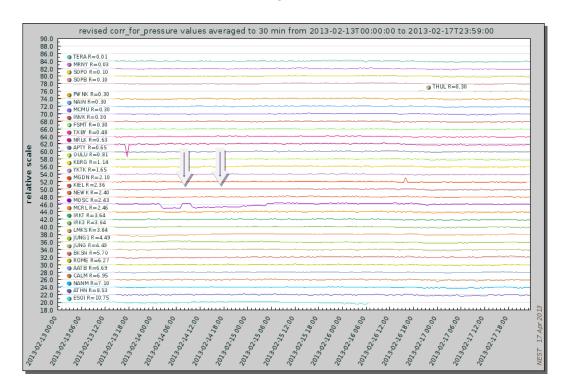


Рис. 29. Изменение потока вторичных космических лучей (условные единицы) 13-17.02.2013 г. по данным сети нейтронных мониторов [10].

Такое явление при отсутствии выбросов корональных масс, возможно, было обусловлено рассеянием галактических лучей на облаке пылевидных частиц, «сопровождавших» небесное тело в межпланетном пространстве.

10. Интенсивность метеорных потоков, регистрируемых радиолокационными станциями УКВ-диапазона

Образующиеся при вхождении в плотные слои атмосферы метеоритов на высотах ниже 120 км ионизированные следы содержат значительное количество электронов, концентрация которых на порядки превышает фоновую концентрацию электронов в ионосфере.

При радиолокационном зондировании таких следов (радиометеоров) отраженный сигнал существенно превышает уровень шума и легко регистрируется, что дает информацию об амплитудно-временных характеристиках сигнала, дальности до цели, допплеровского сдвига частоты зондирующего импульса.

Данные наблюдений УКВ РЛС (33.3 МГц) НПО «Тайфун» в г. Обнинске по регистрации численности радиометеоров в период 11-17 февраля 2013 г. в направлении на запад (W) приведены на рис. 30-31.

На рис. 31 по оси ординат приведены значения разностей между среднечасовыми значениями численности в различные дни февраля и

среднемесячным суточным ходом численности в феврале (Δn). Пробелы в данных были обусловлены техническими причинами.

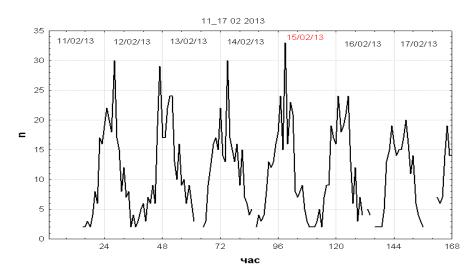


Рис. 30. Вариации среднечасовых значений численности метеоров в период с 11 по 17 февраля 2013 г. (Направление зондирования — на запад).

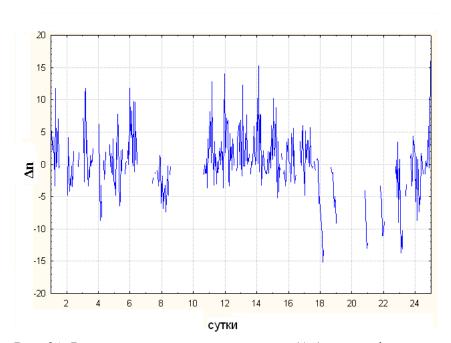


Рис. 31. Разности численности метеоров (Δn) между фактическими среднечасовыми значениями численности и среднемесячными значениями (февраль 2013 г.)

В середине февраля численность регистрируемых метеоров существенно превышала среднемесячную. При этом после 14 февраля наблюдался спад активности. После 17 февраля наблюдалась активность ниже среднемесячной.

Обращает на себя внимание и период в начале февраля с активностью выше среднемесячной, что может указывать на то, что в феврале, возможно, был активен не один поток, а несколько слабоизученных ме-

теорных потоков. Естественно, не очень активные метеорные потоки диагностируются не с такой степенью надежности, как хорошо известные потоки типа Квадрантид, Геменид, Леонид, Персеид и др. Их регистрация с помощью УКВ РЛС проводится регулярно.

Мониторинг метеорных явлений с помощью УКВ РЛС позволить в перспективе изучить повторяемость соответствующих вариаций численности радиометеоров в различных географических регионах.

11. Космическая пыль как предиктор вторжения небесных тел в атмосферу Земли

Метеорный поток представляет собой рой метеорных тел, двигающихся вокруг солнца по одинаковым орбитам. Встречаясь с Землей, метеорные тела, относящиеся к одному потоку, имеют одинаковую скорость и двигаются параллельными путями, данное явление происходит ежегодно. При этом морфология распределения осколков такова, что мелкие фракции метеоритов опережают более крупные фрагменты. Наиболее крупные болиды достигают земной поверхности [1, 10 – 12].

Помимо космической пыли из межпланетного пространства при падении болида генерируется аэрозоль за счет его разрушения. Частицы межпланетной и межзвёздной пыли с размерами от 0,1 мкм до 25-40 мкм постоянно поступают в атмосферу Земли. На высотах 70-90 км метеорное вещество реконденсируется с образованием аэрозоля с преимущественными размерами 2-5 нм [13].

В [14] выдвинуто предположение о том, что если рассматривать длительные временные циклы, то крупные метеориты являются основным источником метеоритной пыли микрометрового размера, существующей на поверхности Земли. Анализ частиц стратосферных аэрозолей показывают, что около половины частицы содержат 0,5 до 1,0% метеоритного железа от своей массы, что соответствует притоку 8-38 Гт внеземного вещества в год. Отношение Na/Fe в этих стратосферных частицах выше, а Mg/Fe и Ca/Fe — ниже, чем в хондритовых метеоритов. Исследование показывает, что, возможно, внеземные компоненты, которые находятся в мезосфере и стратосфере не хондритового состава [14]. Прямое изучение химического состава отдельных частица аэрозоль на высотах от 5 до 19 км, показывает, что в верхней тропосфере аэрозоль часто содержит больше органического вещества, чем сульфатов. Хотя стратосферный аэрозоль в основном состоит из серной кислоты и воды, в его составе в большом количестве был обнаружен метеоритный материал.

После падения метеороида в ФГБУ «ИПГ» обсуждалась гипотеза о приходе его крупных частей в пылевом облаке частиц различного размера (в том числе микро- и наночастиц), причем космическая пыль могла достигнуть ОКП за несколько часов до вхождения болида в плотные слои

атмосферы, хотя максимум метеоритного потока «Виргилид» совпал с падением метеороида.

Такая гипотеза позволяет объяснить появление тяжелых заряженных частиц на орбитах КК ГЛОНАСС, увеличение концентрации молекул воды на орбите Метеор-М №1, а также Форбуш-подобное понижение плотности потока вторичных космических лучей на нейтронном мониторе в ИЗ-МИРАНе. Последнее могло быть вызвано рассеянием галактических космических лучей на дисперсном образовании.

Таким образом, в качестве краткосрочного (за 1–3 часа) предиктора появления крупных осколков метеороидного вещества можно рассматривать увеличение содержания космической пыли на высотах до 15000 км.

Заключение

В результате обработки данных наблюдений за падением и взрывом Челябинского метеороида с помощью различных технических средств выявлены:

- следы метеороида при входе в атмосферу в видимом (0,73 мкм), ближнем инфракрасном (3,8 мкм), дальнем инфракрасном (11,0 мкм) диапазонах;
- увеличение концентрации водяного пара на высотах 700 км, подтвержденное различными видами наблюдений (спутниковые наблюдения: в канале поглощения водяного пара (6,8 мкм), а также с помощью радиочастотного масс-спектрометра). Обнаружение следов молекул воды свидетельствует о том, что метеороид может иметь кометное происхождение;
- инфразвуковые волны;
- переоценка кинетической энергии взрыва метеороида в 500 кт, представленной в первые дни NASA, в пользу оценки энергии взрыва болида в 20-40 кт;
- небольшие возмущения ионосферной задержки сигналов ГНСС ГЛОНАСС/GPS над регионом взрыва метеороида;
- аномальные изменения характеристик позиционирования сетевого навигационного приемника ООО «Навгеоком», соответствующие по времени добегания поверхностной волны Релея от эпицентра ударной волне взрыва;
- узкие пучки возмущений на вертикальных разрезах ионосферы над европейской территорией России через несколько часов после взрыва;
- эффект регионального проседания ионосферы через несколько часов после взрыва метеороида на высотах до 250 км;
- устойчивое аэрозольное облако на высотах 34-38 км, представляющее собой фрагменты метеорного вещества ещё до возгорания, при вхож-

дении в плотные слои атмосферы. При наличии водной компоненты вещество испарилось совместно с мелкими аэрозольными фракциями, и образовавшееся облако под воздействием зональных ветров наблюдалось в течение более двух недель после падения метеороида и несколько раз опоясало земной шар;

- потоки тяжелых заряженных частиц, с характеристиками отличными от фона, за 1-3 часа до и после взрыва метеороида;
- аномальные ошибки позиционирования навигационного приемника в г. Екатеринбург после добегания сейсмической волны от взрыва метеороида;
- существенное увеличение вариаций ионосферной задержки над Екатеринбургом после взрыва метеороида;
- Форбуш-подобное понижение плотности нейтронного потока.

Высокие скорости космических объектов и ограниченные возможности современных технических средств контроля космического пространства обусловливают невозможность заблаговременного обнаружения астероидов размером менее 100 метров в видимом диапазоне.

Возможной характеристикой риска кометно-астероидной опасности может быть увеличение концентрации космической пыли и потока тяжелых заряженных частиц за 1—3 часа до появления метеороида, а так же увеличение численности радиометеоров и снижение нейтронного фона за сутки до падения Челябинского метеороида.

В перечень опасных гелиогеофизических явлений (ОГЯ) (интенсивных солнечных вспышек, магнитных бурь, сильных возмущений ионосферы, высокого уровня ультрафиолетового потока солнечного излучения) целесообразно включение кометно-астероидные риски и падение крупных метеоритов. Падение обломков космического мусора учтено в руководящих документах МЧС России.

Литература

- 1. Тертышников А.В. Основы мониторинга чрезвычайных ситуаций. Москва-Обнинск, 2012. 278 с.
- 2. http://news.mail.ru/story/incident/meteor/
- 3. CIMSS Satellite Blog. University of Wisconsin-Madison/Space Science and Engineering Center// http://cimss.ssec.wisc.edu/goes/blog/archives/12356.
- 4. Ens T.A., Brown P.G., Edwards W.N., Silber E.A. Infrasound production by bolides: A global statistical study//Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 2012, v. 80. P. 208–229.
- 5. Edwards, W.N., Brown, P.G., ReVelle, D.O. Estimates of meteoroid kinetic energies from observations of infrasonic airwaves//Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 2006, v. 68. P. 1136–1160.
- 6. Тертышников А.В., Большаков В.О. Технология мониторинга ионосферы с помощью приемника сигналов навигационных КА GPS/ГЛОНАСС (Galileo) // Информация и космос, 2010, № 1. С.100-105.
- 7. Wilson C.R., Oldham J., Olson J.V., Szuberia C.A. Auroral infrasound and associated cosmic noise absorption events at I53US//InfraMatics, 2010, № 27. P. 2–11.
- 8. http://vestnik.geospace.ru/index.php?id=48.
- 9. Klekociuk A.R., Peter G., Dee W. Pack. et al. Meteoritic dust from the atmospheric disintegration of a large meteoroid//Nature. 2005, V.436. № 7054. P. 1132–1135.
- 10. http://www.nmdb.eu/nest/.
- 11. Тертышников А.В. Организация прогнозирования природных чрезвычайных ситуаций. Обнинск, 2012. 270 с.
- 12. Мак-Кинли Д. Методы метеорной астрономии. М.: Мир, 1964.
- 13. Klekociuk A.R., Brown P.G., Pack D.W., ReVelle D.O., Edwards W.N., Spalding R.E., Tagliaferri E., Yoo B.B., Zagari J. Meteoritic dust from the atmospheric disintegration of a large meteoroid// Nature. 2005, Aug. 25.
- 14. Овзегельдыев Б. Л., Кащеев В. А., Нечитайленко А.В. Глобальная система метеорных наблюдений// Вестник РАН, № 9, 1986. С. 83–86.

Geophysical conditions at the explosion of the Chelyabinsk (Chebarkulsky) meteoroid in February 15, 2013

Authors: Alpatov V.V., Burov V.N., Vagin J.P., Galkin K.A., Givishvili G.V., Gluhov J.V.,

Davidenko D.V., Zubachev D.S., Ivanov V.N., Karhov A.N., Kolomin M.V., Korshunov V.A., Lapshin V.B., Leshenko L.N., Lysenko D.A., Minligareev V.T.,

Morozova M.A., Perminova E.S., Portnyagin J.I., Rusakov J.S., Stal N.L., Syroeshkin A.V., Tertyshnikov A.V., Tulinov G.F., Chichaeva M.A.,

Chudnovsky V.S., Shtyrkov A.Y.

Herein geophysical conditions at the moment of Chelyabinsk (Chebarkulsky) meteoroid fall are presented. Twelve observational methods are used to provide experimental data in the study. Data processing of the geophysical observations during the fall and the explosion of the meteoroid monitoring (through various means) gave the following results:

- the growth of water vapor concentration at the heights of 700 km is detected. This fact is verified by various investigation methods (satellite observations at water vapor absorption channel (6,8 mkm) and RF mass spectrometer, detecting infrasonic waves);
- small perturbations of the ionospheric signals delay of GNSS (GLONAS, GPS) above the explosion region were found;
- abnormal changes of the positional characteristics of the navigation network receiver, LLC "Navgeokom", corresponding to the time lag of the surface Rayleigh waves from the epicenter of the explosion shock wave;
- over few hours after the explosion narrow beams of electron concentrations' perturbations on the vertical sections of the ionosphere above the European part of Russian territory were recorded;
- during several weeks since meteoroid fall a sustained aerosol cloud were observed in the atmosphere at the altitude 34-38 km;
- it was shown that heavy particle fluxes which differ from the background fluxes, were occurred at 1-3 hours before meteoroid fall;
- it was observed significant increase of TEC variation above Ekaterinburg, after the meteor explosion;
- Forbush-like decrease of the neutron flux density was found.

Рекомендовано к публикации Решением Ученого совета ФГБУ «ИПГ» от 10.07.2013 г.

Научный редактор: Лапшин В.Б., Тертышников А.В. Технический редактор: Тертышников А.В., Перминова Е.С. Верстка: Тертышников А.В., Перминова Е.С.

Оформление: Перминова Е.С., Тертышников А.В.

Обложка: Тертышников А.В.