

ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ, СОПРОВОЖДАВШИЕ ПАДЕНИЕ ЧЕЛЯБИНСКОГО МЕТЕОРОИДА

© 2013 г. О. И. Бернгардт, А. А. Добрынина, академик Г. А. Жеребцов, А. В. Михалев, Н. П. Первалова, К. Г. Ратовский, Р. А. Рахматулин, В. А. Саньков, А. Г. Сорокин

Поступило 29.04.2013 г.

DOI: 10.7868/S0869565213270157

Полет и взрыв над территорией России 15 февраля 2013 г. Челябинского метеороида является уникальным событием для геофизики, физики атмосферы и ионосферы Земли. За последние 100 лет это второе по величине астрономическое тело, вторгшееся в атмосферу Земли. По опубликованным данным NASA взрыв метеороида произошел в 03:20:33 UT на высоте 23 км в точке с координатами 54.8° с.ш., 61.1° в.д. Энергия взрыва по разным оценкам составила 100–440 кт в тротиловом эквиваленте. В настоящей работе представлены результаты наблюдений в азиатском регионе сейсмических, акустических, магнитных, ионосферных и оптических эффектов, сопровождавших падение метеороида. Анализируемый период характеризовался спокойной геомагнитной обстановкой (индекс K_p не превышал 1 в интервале 00:00–12:00 UT) и отсутствием солнечных вспышек класса C и выше (отмечена вспышка B5.1 в 01:55–02:01 UT). Сейсмический фон также был спокойным за исключением землетрясения на о. Тонга (03:02:16 UT, магнитуда 5.8), зарегистрированного в Южном полушарии на расстоянии 14000 км от места взрыва. Падение метеороида произошло на восходе Солнца, потенциальное влияние солнечного терминатора (СТ) учитывали при анализе ионосферных данных. На рис. 1 представлена карта наблюдений, отмечено место и время (UT) начала регистрации геофизических эффектов в азиатском регионе.

На 12 сейсмических станциях, расположенных на расстояниях 252–3204 км от места взрыва Челябинского метеороида, а зарегистрированы короткопериодные колебания (период 3–16 с, амплитуда 0.03–0.3 мкм, длительность до 1 мин), которые мо-

гут быть интерпретированы как поверхностная волна, вызванная ударной волной от взрыва метеороида. Скорость поверхностной волны составила 3.1 км/с, глубина проникновения в литосферу 3–21 км. Характеристики поверхностной волны соответствовали землетрясению с магнитудой 3.1, сейсмической энергией $3.8 \cdot 10^9$ Дж и сейсмическим моментом $2.3 \cdot 10^{13}$ Н·м. Распространение сейсмической волны характеризовалось азимутальной анизотропией: волна уверенно фиксировалась на станциях, расположенных к югу и востоку от места взрыва, но не проявлялась или проявлялась крайне слабо на станциях, лежащих в западном и северном квадрантах.

Инфразвуковой сигнал от взрыва метеороида наблюдался в 05:51 UT на инфразвуковой станции (TOR) на расстоянии 2780 км к востоку от места взрыва. Характерное время задержки относительно момента взрыва составило 2.5 ч, что соответствует распространению зарегистрированного сигнала со звуковой скоростью. Амплитуда инфразвукового сигнала более чем на порядок превышала уровень атмосферного фона. В сигнале наблюдалось три группы цуговых колебаний, из которых наиболее продолжительной и мощной являлась первая (длительность 650 с, амплитуда 15 микробар). По оценке, сделанной на основе среднего периода зарегистрированных колебаний, энергия ударной волны составила около $6 \cdot 10^{14}$ Дж.

Регистрация длиннопериодных вариаций магнитного поля Земли на среднеширотных и авроральных станциях не выявила заметных возмущений в период 00:00–06:00 UT. Анализ записи индукционных магнитометров на среднеширотных обсерваториях Монды (MOND), Томск (TOMS) и Петропавловск-Камчатский (PAR) показал наличие шумового всплеска в вариациях геомагнитного поля в диапазоне частот 0.2–5 Гц в интервале 02:45–02:58 UT, т.е. за 35 мин до взрыва метеороида. По данным высокоширотной обсерватории Норильск (NOR) заметного всплеска не обнаружено. Причиной шумового всплеска на спокойном

*Институт солнечно-земной физики
Сибирского отделения Российской Академии наук,
Иркутск*

*Институт земной коры
Сибирского отделения Российской Академии наук,
Иркутск*

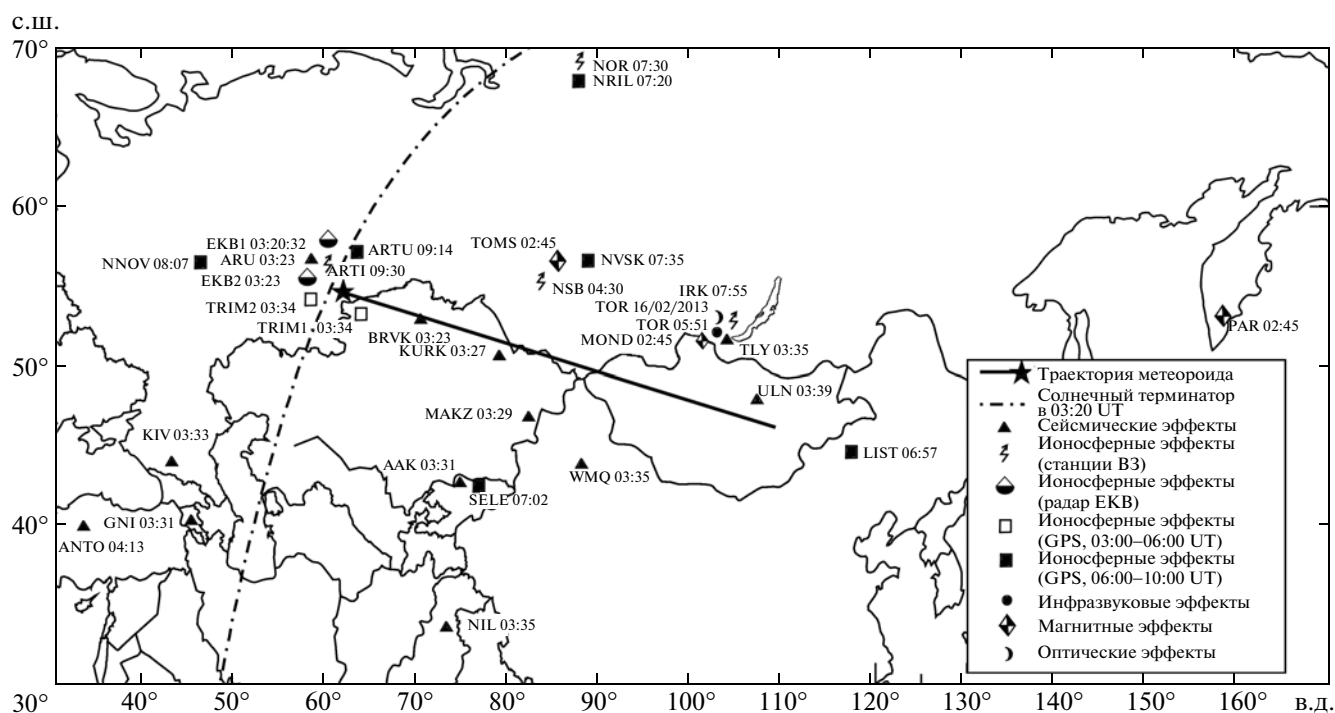


Рис. 1. Карта регистрации геофизических эффектов в азиатском регионе, сопровождавших падение Челябинского метеороида. Показано место и время (UT) начала регистрации эффектов. Время взрыва метеороида 03:20:33 UT.

геомагнитном фоне может являться взаимодействием метеороида с плазмосферой Земли. В спокойных условиях граница плазмосферы располагается на расстоянии 5–6 радиусов Земли. Время, которое необходимо метеороиду, чтобы достичь поверхности Земли после входа в плазмосферу, может составлять от 40 до 20 мин при скорости 15–30 км/с. Эта оценка согласуется с наблюдением шумового всплеска за 35 мин до взрыва метеороида. Отсутствие эффекта в Норильске может быть обусловлено тем, что проекция плазмопаузы на поверхность Земли находилась южнее Норильска.

Ионосферные наблюдения на сети станций вертикального зондирования (ВЗ) показали наличие крупномасштабных волнообразных возмущений в вариациях максимума электронной концентрации ионосферы. Относительная амплитуда возмущений составляла 20% от фоновых значений. Возмущения в Новосибирске (NSB), Норильске (NOR) и Иркутске (IRK) имели близкую волнообразную форму с характерным периодом около 1 ч. Предположительно эти возмущения обусловлены внутренней гравитационной волной, порожденной взрывом Челябинского метеороида. Возмущения после взрыва метеороида наблюдали в Новосибирске, Норильске и Иркутске спустя 1,2, 4,1 и 4,6 ч соответственно. Средние скорости распространения волны характеризовались большим разбросом: от 140 м/с для Норильска до 320 м/с для Новосибир-

ска. Такой разброс скоростей может быть связан с особенностями распространения акустических и внутренних гравитационных волн в атмосфере. Возмущение, наблюдавшееся в Екатеринбурге (ARTI) спустя 6,2 ч после взрыва метеороида, на данный момент не имеет объяснения.

Исследование вариаций полного электронного содержания (ПЭС) в диапазоне периодов 2–20 мин проведено на основе 30-секундных данных станций GPS, расположенных в зоне взрыва метеороида, вдоль и на удалении от его траектории. Через 14 мин после взрыва на близлежащих GPS-станциях наряду с эффектами СТ зарегистрированы возмущения ПЭС (TRIM1, TRIM2), предположительно вызванные ударной волной от взрыва. Амплитуда возмущений в 1,2–2,5 раза превышала уровень флуктуаций ПЭС в контрольные дни. Период возмущений составлял около 15 мин. Возмущения распространялись радиально от точки взрыва до расстояний 500–600 км со скоростью 320–360 м/с (близкой к скорости звука в нижней атмосфере). На GPS-станциях вдоль траектории метеороида в период 02:00–06:00 UT заметных возмущений ПЭС, не связанных с СТ, зарегистрировано не было. В период 06:00–10:00 UT на большинстве станций GPS наблюдались интенсивные возмущения ПЭС (NNNOV, ARTU, SELE, NRIL, NVSK, LIST), имевшие форму волновых пакетов длительностью 30–40 мин. Приро-

да данных возмущений пока не выяснена и требует дальнейших исследований.

С помощью ионосферного когерентного радара в период 03:20:32–03:20:52 UT на частоте 10 МГц зарегистрировано появление короткоживущего трехскачкового сигнала (ЕКВ1) на расстояниях 600, 1600 и 2700 км в северо-северо-восточном направлении от места расположения радара. Эффект можно объяснить возникновением в 03:20:32 UT крупномасштабной ионизованной области (высота 80–115 км, плазменная частота более 3 МГц, поперечный размер более 500 км, время жизни 20 с), исчезнувшей в результате рекомбинационных процессов. В период 03:20:40–03:20:52 UT наблюдалось резкое возрастание уровня радишума на частоте 10 МГц, возможно, связанное с электрофонным характером болида. В период 02:45–03:45 UT к югу от радара на высоте E-слоя сформировалось облако повышенной электронной концентрации, которое дрейфовало со скоростью 50 м/с с востока на запад. Это позволило в 03:23 UT на расстоянии 200 км от места падения метеороида зарегистрировать появление ионосферных неоднородностей (ЕКВ2), двигавшихся с высокой скоростью (200 м/с). Природа этих неоднородностей, возможно, связана с прохождением ударной волны в E-слое ионосферы.

Оптические наблюдения (TOR) показали увеличение яркости ночного неба (до 50% относительно предшествующих ночей) в первые две ночи после падения Челябинского метеороида. В настоящее время не представляется возможным однозначно связать указанное увеличение яркости ночного неба с полетом Челябинского метеороида, однако аналогичный эффект наблюдался в Европе после падения Тунгусского метеороида. Эффект можно

объяснить переносом продуктов взрывов крупных метеороидов на высотах стратосферы на большие расстояния с учетом сезонных направлений зональных ветров на этих высотах. Это объясняет расположение зоны аномального свечения ночного неба западнее места падения Тунгусского метеороида летом и возможное увеличение яркости ночного неба восточнее места падения Челябинского метеороида зимой. Анализ вариаций интенсивности мезосферной эмиссии атомарного кислорода [OI] 557.7 нм выявил в первую ночь после падения метеороида изменение характеристик этой эмиссии, обычно регистрируемых после землетрясений (снижение средней ночной интенсивности эмиссии 557.7 нм, изменение типа ночного хода и статистических характеристик вариаций интенсивности этой эмиссии в течение ночи).

Общий анализ данных широкой сети геофизических инструментов в азиатском регионе позволил выявить эффекты в литосфере, атмосфере, ионосфере и геомагнитном поле, сопровождавшие падение Челябинского метеороида. Для выявления эффектов большое значение имели спокойная геомагнитная обстановка и работа геофизических инструментов в режиме мониторинга. Полученные результаты представляют интерес для дальнейших научных исследований.

Авторы выражают глубокую благодарность за предоставление данных геофизических наблюдений Б.М. Шевцову (ИКИР ДВО РАН), В.В. Чечельницкому (БФГС СО РАН), Н.В. Шестакову (ДВФУ, ИПМ ДВО РАН), А.Ю. Белинской (обс. “Ключи” ГС СО РАН), О.А. Кусонскому (обс. “Аркти” ИГФ УрО РАН), центрам данных Iris/Ida, Iris/USGS, SOPAC, INTERMAGNET, НАВГЕОКОМ, ИПА РАН.