

УДК 523.68

О КОСМИЧЕСКИХ ЛИМБОВЫХ НАБЛЮДЕНИЯХ БОЛИДОВ

© 2019 г. Н. Н. Горькавый*

Крымская астрофизическая обсерватория РАН, Крым, Россия

**e-mail: nickgorkavyi@gmail.com*

Поступила в редакцию 30.10.2017 г.

После доработки 09.01.2018 г.

Принята к публикации 23.07.2018 г.

Лимбовый сенсор LP/OMPS спутника Suomi в 2013 г. зафиксировал атмосферный след Челябинского суперболида с энергией свыше 400 кт ТНТ. Изучение данных LP/OMPS показывает, что он регистрирует каждый год несколько болидов с гораздо меньшей энергией. В статье рассматриваются случаи наблюдения трех болидов в 2016–2017 гг.: 6 февраля 2016 г. (13 кт), 3 марта 2016 г. (0.19 кт), 9 марта 2017 г. (1 кт). Обсуждается возможность повышения эффективности регистрации болидов с помощью лимбового сенсора в виде микроспутника с увеличенным количеством зон наблюдения вдоль горизонта. Несколько таких микроспутников смогут отследить большинство тел крупнее метра, сгорающих в атмосфере Земли или Марса.

Ключевые слова: болиды, космические наблюдения атмосферы, лимбовый сенсор

DOI: 10.1134/S0320930X19010031

1. ВВЕДЕНИЕ

Астероиды размером 1–10 м представляют значительный интерес: их достаточно много возле Земли (что в принципе позволяет надежно определить их функцию распределения по размерам). Эта функция может быть экстраполирована на область размеров астероидов более 10 м (нижняя граница популяции потенциально опасных околоземных астероидов) – как показывает пример Челябинского суперболида, вызванного падением космического тела диаметром 18–20 м (Brown и др., 2013; Попова и др., 2013; сб. “Челябинский суперболид”, 2016). Астероид, вызвавший Челябинский суперболид, прилетел с дневной стороны и не мог быть обнаружен современными телескопическими средствами. Даже на ночном небе телескопические наблюдения мелких тел затруднены, так как они обладают слабым блеском и быстро двигаются. Для эффективности поиска таких космических тел применяют специальные ухищрения, например, сотрудники Института астрономии РАН изучают наличие дециметровых тел в радиантах метеоритных потоков, где область локализации известна, а смещение наблюдаемых объектов может быть очень мало (Барабанов и др., 1996; Барабанов, Смирнов, 2005). Телескопическими методами за всю историю наблюдений были открыты всего два астероида (с примерным диаметром 2–5 м каждый), которые потом вошли в атмосферу Земли в виде болидов: 2008 TC3 и 2014 AA, вызвав взрывы с

мощностью около килотонны (см., например, Williams (2014)). Поэтому возникает актуальная проблема анализа околоземной популяции астероидов с размером более одного метра.

Атмосфера Земли представляет собой огромный детектор, эффективно выявляющий космические тела в момент их разрушения и превращения в яркие болиды. Это открывает возможность для изучения распределения мелких околоземных тел. Оптические наблюдения болидов как вспышек в атмосфере затруднены, потому что болид светится считанные секунды. Геостационарный спутник Метеосат-8 обнаружил вспышку от астероида 2008 TC3 по счастливой случайности, потому что он фотографирует Землю с интервалом от 5 до 15 мин.

Кроме вспышки, яркие болиды оставляют в атмосфере аэрозольный след. Спутниковые наблюдения болидных следов в атмосфере обладают рядом преимуществ по сравнению с регистрацией вспышки, потому что болидный след в атмосфере виден продолжительное время – типично до нескольких дней – что значительно упрощает его обнаружение.

Особенно полезен для наблюдения разреженных аэрозольных следов лимбовый сенсор, который представляет собой космический регистратор излучения атмосферы, направленный на планетарный горизонт. Он наблюдает локальный вертикальный профиль атмосферы до высоты около 100 км. Такой сенсор может регистриро-

вать свет звезд или Солнца вблизи заката или после рассвета, когда светило проходит через наблюдаемую часть атмосферы, или может быть сконструирован для наблюдения рассеянного солнечного света в атмосфере. В настоящее время лимбовыми сенсорами снабжены несколько космических аппаратов, в частности, спутник Suomi, запущенный в 2011 г. Лимбовый сенсор LP/OMPS Suomi смотрит назад по направлению движения спутника и регистрирует тремя каналами (левый канал направлен восточнее центрального, правый – западнее) три вертикальных, расположенных недалеко друг от друга (250 км по горизонтали), профили солнечного света, рассеянного в атмосфере. Сенсор работает на дневной части гелиоцентрической орбиты (ее восходящей ветви), пересекая экватор в 1 ч 30 мин локального времени и совершая примерно 14 оборотов вокруг планеты за сутки. В течение одного пролета сенсор делает 180 изображений на матрице, снимая спектр в диапазоне от 0.3 до 0.9 мкм для каждого километра высоты атмосферы. Одной из задач данного сенсора является регистрация аэрозольного слоя Юнге и сильных вулканических выбросов пепла и диоксида серы, достигающих стратосферы. Типичный размер частиц в таких стратосферных аэрозольных образованиях составляет десятки доли микрона. Сенсор регистрирует облака из частиц любого химического состава, который влияет на долговременную эволюцию аэрозольного облака. Например, сразу после вулканического извержения наблюдается пик плотности вулканической пыли; спустя несколько недель или месяцев, в зависимости от силы извержения, пика плотности достигает аэрозольный слой из сконденсировавшихся капелек серной кислоты. Локальность зоны наблюдений (только на горизонте) окупается исключительной чувствительностью лимбового сенсора к присутствию аэрозоля на высотах от 15 до 85 км, что связано с большой толщиной атмосферы вдоль луча зрения, идущего по касательной к поверхности Земли, и с отсутствием фона в виде освещенной земной поверхности.

2. НАБЛЮДЕНИЕ БОЛИДОВ С ПОМОЩЬЮ ЛИМБОВОГО СЕНСОРА

В феврале 2013 г. лимбовый сенсор Suomi зафиксировал в атмосфере на высотах 28–67 км мощное облако, возникшее после Челябинского суперболида от 15 февраля 2013 г., который взорвался в 3 ч 20 мин по Гринвичу (9 ч 20 мин по местному времени) и своей ударной волной вызвал значительные повреждения зданий и травмы у многих людей, попавших под действие волны (Brown и др., 2013; Попова и др., 2013; сб. “Челябинский суперболид”, 2016). Спутник приблизился к зоне болида спустя несколько часов после

взрыва астероида. Совершая орбитальный виток номер 6752, он засек самую высокую часть болидного облака. Она была снесена ветром на восток со скоростью около 85 м/с и была зарегистрирована правым каналом лимбового сенсора спустя три с половиной часа после взрыва, в точке с координатами около 55° с.ш. и 80° в.д., недалеко от Новосибирска (Gorkavui и др., 2013; Горькавый и др., 2013; сб. “Челябинский суперболид”, 2016). При этом болидный след был зарегистрирован сразу на двух высотах: плотное облако на высоте около 52 км и разреженный след на 67 км (Горькавый, 2016).

На следующем витке спутниковая орбита 6753 пролегла прямо над Челябинском, где на атмосферном профиле светимости, измеренном на левом канале сенсора, была найдена самая низкая и медленнодвигающаяся часть болидного облака с координатами 54.4° с.ш. и 63.8° в.д. (Gorkavui и др., 2013; Горькавый, 2016). Измерение было сделано спустя 5 ч 14 мин после взрыва (это значение времени точнее, чем приведенное в Gorkavui и др. (2013)). Высота облака составляла 28–29 км и коэффициент экстинкции (оптическая толщина на километр вдоль луча зрения) – $5 \times 10^{-4} \text{ км}^{-1}$.

Через несколько дней после взрыва болидное облако,двигающееся на восток на разных высотах с разными скоростями, растянулось вокруг земного шара, и его голова догнала хвост, как это показывают данные лимбового сенсора, где на каждом витке прибор регистрировал сразу два аэрозольных сигнала (рис. 1а) – правда, самый высокий сигнал первого дня от облака – 67 км – нигде больше зарегистрирован не был, видимо, из-за того, что облако в таком разреженном воздухе и при столь сильных ветрах (на высоте 50 км скорость ветра в тот день достигала 85 м/с (Gorkavui и др., 2013)) быстро рассеивается.

Рис. 1 показывает распределение аэрозольного индекса рассеяния в зависимости от широты и высоты. Этот индекс вычисляется как отношение наблюдаемого свечения атмосферы в длине волны 674 нм к теоретически вычисленному значению без учета аэрозоля. Следовательно, любое аэрозольное образование из субмикронных частиц, хорошо рассеивающих солнечный свет, вызовет отклонение наблюдаемого свечения от теоретически ожидаемого. Рис. 1 получен переводом цветного оригинала (примеры см. в сб. “Челябинский суперболид”, 2016) в черно-белый вариант, поэтому часть информации утрачена. Но следы болидов видны отчетливо и на черно-белой картинке. Мы можем уверенно утверждать, что это следы падения космических тел, потому что выше 30–35 км в атмосфере средних широт вообще не должно быть никаких аэрозольных облаков, за исключением следов взлетающих ракет, места и времени стартов которых хорошо извест-

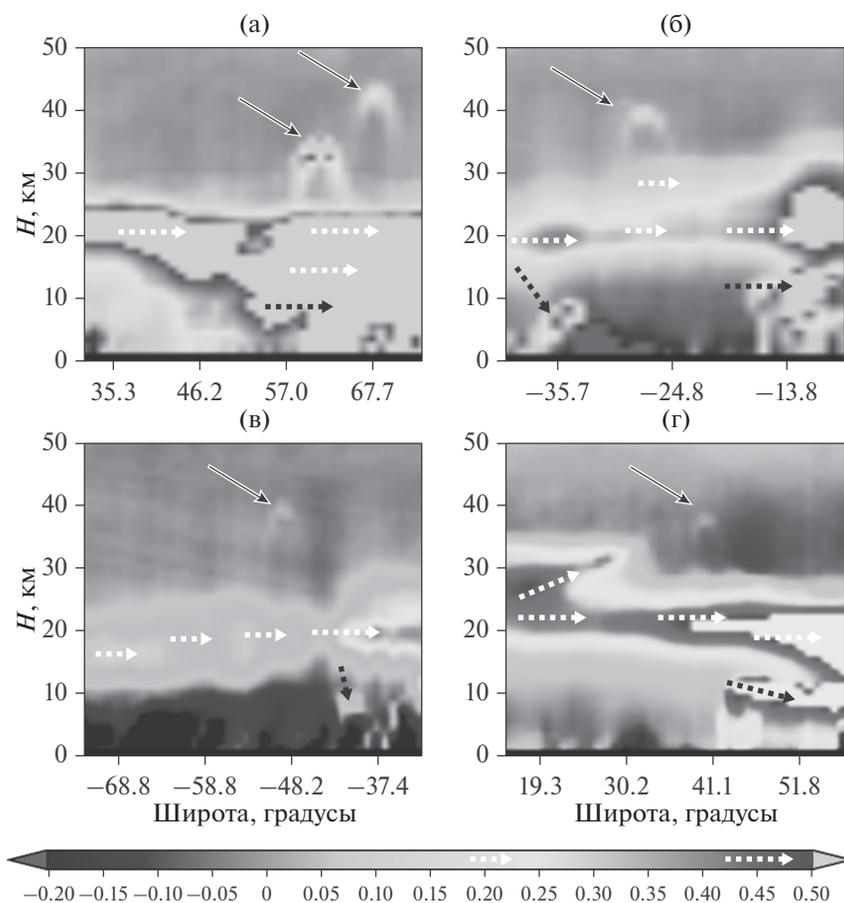


Рис. 1. Аэрозольный индекс 674 нм из данных LP/OMPS Suomi. Штрихованными белыми стрелками показаны самые плотные части стратосферного аэрозольного слоя Юнге, соответствующие правой части шкалы плотности; штрихованными черными стрелками показаны тропосферные облака. Сплошные стрелки указывают на следы болидов, расположенных в слоях стратосферы выше 30–35 км. Данные NASA/NOAA/SSAI. (а) – Сдвоившийся след Челябинского суперболида на орбите 6851 (правый канал) от 22 февраля 2013 г. Более плотное (коэффициент экстинкции $4.7 \times 10^{-5} \text{ км}^{-1}$) и низкое облако (34 км) зарегистрировано на 62° с.ш. и 84° в.д. в 6 ч 23 мин по Гринвичу. Более разреженное и высокое (42 км) облако расположено на пять градусов севернее и сделало лишний оборот вокруг Земли, догнав более медленное низкое облако. (б) – Самый яркий болид после Челябинского, взорвался 6 февраля 2016 г. над Атлантикой. Орбита 22181 (левый канал) от 7 февраля 2016 г. (в) – 3 марта 2016 г., на орбите 22531 (левый канал), зарегистрирован слабый след от небольшого болида в 0.19 кт. (г) – 9 марта 2017 г. болид в 1 кт был зарегистрирован Suomi на орбите 27796 (на рисунке приведены данные центрального канала).

ны: следовательно, такие искусственные облака могут быть легко идентифицированы. Все обычные облака и аэрозольный слой Юнге располагаются ниже этих высот (см. рис. 1), а полярные мезосферные и стратосферные облака возникают близко к полюсам и имеют четкую сезонную зависимость, что позволяет легко отличать их от следов болидов. Отметим, что из-за геометрии лимбового наблюдения, которое при движении спутника фиксирует облако на разных проективных высотах (над горизонтом), болидные облака выглядят как арки с наиболее яркой частью на максимальной высоте наблюдения.

Облако, оставшееся после Челябинского болида, возникло, вероятно, при конденсации льда на каменных метеоритных пылинках – так же,

как белый след за самолетом конденсируется на частичках сажи. На это указывают, в частности, цветовые вариации следа Челябинского болида, явно связанные с высотными вариациями размера частиц из-за разных температур воздуха (Горькавый и др., 2014). Это признак конденсации частиц в воздухе: размеры пыли, полученной в ходе разрушения, вряд ли бы существенно зависели от температуры воздуха. Облако было настолько масштабным, что рассеивалось в течение многих недель. Его следы в атмосфере можно было найти даже спустя три месяца (Gorkavyy и др., 2013). По данным NASA общая энергия Челябинского суперболида, т.е. кинетическая энергия тела до входа в атмосферу, составляла 440 кт (Fireballs Reported by US Government Sensors, JPL/NASA);

оценки другими методами дают энергию около половины мт (Brown и др., 2013; Попова и др., 2013; сб. “Челябинский суперболид”, 2016), что представляет собой хорошее согласие. Размер астероида Челябинск мог достигать 20 м. После этого события, показавшего опасность подобных малых тел, NASA с марта 2013 г. стало публиковать каталог ярких болидов (Fireballs Reported by US Government Sensors, JPL/NASA) на основании, в частности, данных военных спутников США, которые отслеживают аномальные вспышки в атмосфере. Например, в 2016 г. в этом каталоге зарегистрировано 32 болида с энергиями 0.1–10 кт (здесь и далее мы будем понимать под энергией болида кинетическую энергию тела до входа в атмосферу) (Fireballs Reported by US Government Sensors, JPL/NASA).

Отметим, что взрывы болидов, обладающих огромными энергиями, логично характеризуются величинами “кт ТНТ”, пришедшими из области испытаний ядерных бомб. Но существует трактовка термина “болид” лишь как светового явления, пришедшая к нам с древних времен, когда причина этого феномена — вход в атмосферу космического тела — была совершенно непонятна. Эта устаревшая трактовка приводит к тому, что термин “болид” в большинстве случаев оказывается бесполезным. Действительно, световое явление не может взрываться, оно не имеет определенной скорости или высоты, потому что световой сигнал болида распределяется сразу по разным высотам и обладает переменной визуальной скоростью (например, светящийся хвост Челябинского суперболида был неподвижен, в то время как головная часть быстро двигалась). Тем более для болида нельзя ввести понятия плотности или химического состава. Аналогичная проблема с более слабыми явлениями — метеорами — решается тем, что введен специальный термин для физического тела, вызывающего явление метеора, — “метеороид”. Но согласно решению терминологической комиссии Международного астрономического союза от 2017 г., метеороидами называются только тела с размером менее 1 м. Тем самым, более крупные космические тела, порождающие болиды, остались без своего названия. Эта проблема неразвитости терминологии может быть решена расширением понятия “метеороид” на другие размеры, или обобщения понятия “болид” не только на световые и прочие феномены, но и на само космическое тело, породившее болид. Аналогичная эволюция термина произошла, когда слово “комета”, которое в средневековье обозначало лишь хвостатое световое явление на небе, распространилось и на “ядро кометы”, благодаря чему современные космические аппараты могут высаживаться на комету без терминологической неловкости. В данной статье под термином “бо-

лид” автор будет понимать и само космическое тело, которое движется в атмосфере.

После обнаружения отчетливых следов Челябинского болида в данных Suomi, автор изучил данные LP/OMPS за весь период систематических наблюдений, которые начались с марта 2012 г. Автор рассматривал три вида данных лимбового сенсора: коэффициент экстинкции — официальный продукт, который представляет собой количественную характеристику наблюдаемого аэрозоля, но рассчитывается лишь до высот <40 км (см. Gorkavuy и др., 2013; и илл. 116 в статье Горькавого, 2016); отношение интенсивности излучения в разных длинах волн, что позволяет качественно изучить распределение аэрозоля с высотой до 80–90 км по покраснению спектра излучения (см. илл. 117 в статье Горькавого, 2016); и параметр ASI (аэрозольный индекс рассеивания) (см. илл. 122, 123 у Горькавого, 2016). Этот параметр является сейчас официальным продуктом лимбового сенсора Suomi, вместе с высотной-широтными картами распределения этого параметра, используемыми в данной статье.

Оказалось, что в данных лимбового сенсора Suomi ежегодно видны следы нескольких суперболидов с общими энергиями ~0.1–10 кт, и большинство из них соответствует данным болидного каталога NASA. Например, 25 января 2013 г., за три недели до Челябинского события, над Канадой взорвался мощный болид в 6.9 кт. Его след был замечен в атмосфере до тех пор, пока он не смешался с более ярким облаком от Челябинского суперболида.

Рассмотрим более детально три случая болидов, атмосферные следы которых обнаруживаются в данных Suomi за 2016–2017 гг. Болид, самый мощный за пять лет, прошедших после Челябинского, взорвался 6 февраля 2016 г. в 13 ч 55 мин по Гринвичу над южной Атлантикой, в точке 30.4° ю.ш. и 37.2° з.д. на высоте 31 км. Его скорость была 15.6 км/с, а общая энергия составила 13 кт (Fireballs Reported by US Government Sensors, JPL/NASA). В первый раз облако было зафиксировано левым и центральным каналом лимбового сенсора Suomi 7 февраля 2016 г., спустя 28 ч 47 мин после взрыва болида (рис. 16). Такая задержка в регистрации была вызвана тем, что 6 февраля лимбовый сенсор не работал, передавая, согласно расписанию, свой канал связи другому сенсору. К 7 февраля облако уже растянулось на тысячи километров по долготе. Коэффициент экстинкции облака, по данным левого канала, составил $9 \times 10^{-6} \text{ км}^{-1}$, а по данным центрального — $1.2 \times 10^{-6} \text{ км}^{-1}$. Высота облака в обоих случаях составила 40 км, координаты точек регистрации: 28° ю.ш. и 72° з.д. для левого канала и 29° ю.ш. и 74° з.д. для центрального канала. Смещение облака на запад от точки взрыва на 37° по долготе, очевидно, вызвано сильным восточным ветром на высотах >25 км, о чем свидетельствуют данные

атмосферной лаборатории NOAA (ARL NOAA). 6 февраля 2016 г. было осуществлено два ракетных запуска — из Плесецка и Северной Кореи. Эти запуски должны были оставить облака в атмосфере, но в северном полушарии и гораздо восточнее облака, которое было замечено Suomi над Атлантикой. Так как других источников облаков на средних широтах на высотах более 35 км не существует, то мы можем уверенно утверждать, что обсуждаемое облако было оставлено болидом, тем более, что оно было гораздо более плотным и долгоживущим, чем обычные ракетные облака, которые обычно не наблюдаются более 1–2 суток. Исключением, по-видимому, являются полярные области, где благоприятных обстоятельствах (например, слабом ветре) облака ракет, стартовавших из Плесецка или Восточного, могут отслеживаться в течение 5–6 дней (публикация об этих наблюдениях находится в процессе подготовки). Болидное облако, возникшее над Атлантикой, регистрировалось более двух недель; к 23 февраля коэффициент экстинкции облака упал более чем в 10 раз.

Это случай суперболида в 13 кт, который заметно уступает по мощности Челябинскому. Важно определить нижнюю границу возможностей лимбового сенсора для регистрации суперболидов с энергиями менее килотонны. Для них становится существенным расстояние между болидным следом и ближайшими орбитами, потому что лимбовый сенсор Suomi регистрирует распределение атмосферного аэрозоля практически лишь вдоль собственной орбиты. 3 марта 2016 г. в данных спутника Suomi, на орбите 22531, появился слабый след от суперболида с энергией в 0.19 кт ТНТ (Fireballs Reported by US Government Sensors, JPL/NASA) (рис. 1в). Согласно каталогу NASA, в тот день вспышка болида была зарегистрирована на юге Индийского океана, в точке с координатами в 48° ю.ш. и 51° в.д., и на высоте 32 км. Скорость родительского тела болида составляла 11.7 км/с, время взрыва 1 ч 32 мин по Гринвичу. Между взрывом болида и регистрацией следа прошло 9 ч 8 мин. Облако с коэффициентом экстинкции облака $6 \times 10^{-6} \text{ км}^{-1}$ было зарегистрировано левым каналом лимбового сенсора, в точке с координатами в 49° ю.ш. и 55° в.д., и на высоте 40 км. Как правило, центр болидного облака располагается выше точки взрыва, приводимой на сайте JPL/NASA — из-за того, что самая плотная и горячая часть облака поднимается на несколько километров от места образования (точки наибольшего энерговыделения), что случилось и с облаком, вызванным Челябинским суперболидом (Горькавый и др., 2013; сб. “Челябинский суперболид”, 2016). 3 марта 2016 г. и в предыдущие две недели никаких ракетных запусков не было. Отметим, что условия наблюдения болидов южного полушария хуже, чем болидов северного из-за того, что лимбовый сенсор, установленный на спутнике, летящем на север над дневной сторо-

ной планеты, сам смотрит на юг. Из-за асимметрии фазовой функции рассеяния, аэрозоль южного полушария наблюдается в неблагоприятных условиях рассеяния назад, а аэрозоль на севере лучше виден из-за интенсивного рассеяния солнечного света вперед.

9 марта 2017 г. в 4 ч 16 мин по Гринвичу вспышка от болида в 1 кт была зарегистрирована американскими военными спутниками в точке 40.5° с.ш. и 18° з.д., на высоте 23 км. Скорость болида составляла огромную величину — 36.5 км/с (Fireballs Reported by US Government Sensors, JPL/NASA). Облако от этого болида было зарегистрировано Suomi сразу двумя каналами на орбите 27796, проходившей над Атлантикой (рис. 1г). Центральный канал зафиксировал облако с коэффициентом экстинкции $1.3 \times 10^{-6} \text{ км}^{-1}$ в точке с координатами в 40° с.ш. и 8.2° з.д., на высоте 38 км. Левый канал регистрировал более слабое облако с координатами в 40° с.ш. и 5.5° з.д., на высоте 40 км. Между взрывом болида и регистрацией следа прошло 9 ч 14 мин. Тот факт, что сразу два канала зарегистрировали облако, означает, что оно растянулось, как минимум, на 250 км по долготе. Рано утром 7 марта, из космодрома Куру с северной широтой около 5°, была запущена легкая европейская ракета “Вега”, но ее выхлоп должен был располагаться южнее и полностью расцелиться за двое с половиной суток.

Эти данные доказывают, что лимбовый сенсор с чувствительностью, сравнимой с LP/OMPS, может фиксировать суперболиды с небольшой энергией от 0.2 кт и выше. Если предположить, что все обсуждаемые болиды имеют плотность 3.2 г/см^3 , то, с учетом разных скоростей, энергии в 440; 13; 1; 0.19 кт будут соответствовать телам с диаметрами 18.5; 6.8; 1.5 и 1.9 м (болид с энергией 1 кт оказался самым маленьким по размеру родительского тела, потому последнее обладало самой большой скоростью — 36.5 км/с).

Как было указано выше, спутник Suomi движется по полярной орбите, делая 14 оборотов в сутки и измеряя профили атмосферного свечения вдоль орбиты. Следовательно, любое локальное болидное облако, возникшее в атмосфере, будет засечено им не раньше, чем орбита пройдет через область падения болида, т.е. в среднем, через 12 ч. Кроме того, на экваторе каждая орбита отделена от другой промежутком в 25° по долготе. С учетом трех соседних каналов, точки наблюдения которых распределены по экваториальной долготе на промежутке 4.4°, на экваторе ненаблюдаемая зона по долготе составляет 21°, т.е. в 5 раз больше наблюдаемой зоны (расчет для одного пролета). На широте 55° (широта Челябинска) зона наблюдаемости по долготе вырастает до 7.2°, а зона ненаблюдаемости сокращается до 18.2°, что все равно в 2.5 раза больше зоны наблюдения. Если болидное облако попадает в ненаблюдаемый промежуток между орбитами (или между канала-

ми, точки наблюдения которых тоже располагаются на значительном расстоянии друг от друга) и не растягивается ветром так, чтобы пересечь ближайшее узкое поле лимбового сенсора, то спутник его зарегистрировать не может. Он может вернуться к данному месту на следующий день со смещением зон наблюдаемости, но для полного покрытия ему нужно около пяти дней, а за это время аэрозольные облака, вызванные болидами, обычно рассеиваются или смещаются. Очевидно, что если увеличить частоту сканирования и уменьшить время между взрывом болида и регистрацией облака, то чувствительность метода можно заметно повысить. Следовательно, лимбовые сенсоры могут выступать эффективным средством для фиксирования входа в земную атмосферу мелких космических тел с размером ~ 1 м и выше. Конечно, для оценки массы входящих астероидов по образованному в атмосфере следу необходимо определить зависимость плотности образовавшегося облака от скорости ветра, температуры и влажности атмосферы в данной области, а также от массы и химсостава астероида. Каменный астероид разрушается на большей высоте и более быстрым темпом и, возможно, на более мелкие частицы, чем металлический астероид. Когда будет накоплено достаточно наблюдений болидных облаков, это даст возможность определить типичные распределения аэрозольных облаков по высоте и плотности для сгорающих в атмосфере космических тел разного размера и химсостава.

3. ПРОЕКТ ЛИМБОВОГО СЕНСОРА ФОРМАТА “КУБСАТ”

На основе опыта работы с данными лимбового сенсора Suomi мы предложили новый дизайн компактного (формата 3U “Кубсата”) лимбового сенсора для более эффективного сканирования атмосферы на высотах 10–100 км. Проект этого сенсора был поддержан программой IRAD Годдардского центра космических полетов NASA и программой IP/ESTO NASA (DeLand и др., 2017). Новый сенсор нацелен на поиск и изучение следующих аэрозольных событий: следов болидов, сильных вулканических выбросов, полярных стратосферных и мезосферных облаков, а также ракетных выхлопов. Многие из этих аэрозольных облаков могут использоваться для анализа воздушных течений как естественные метеозонды в стратосфере. В отличие от мультиспектрального лимбового сенсора Suomi, новый сенсор будет работать только в трех длинах волн (350, 670, 850 нм), зато количество каналов будет увеличено с 3 до 14 уже в первоначальной версии прибора. По мере накопления опыта работы с новым сенсором, планируется увеличение числа каналов до максимального возможного. Каналы на новом сенсоре направлены не только назад по движению спутника, как на Suomi, но и вперед, и в стороны. В проекции сверху прибор имеет вид восьми-

угольника — и каждая сторона многогранника имеет один или два канала наблюдения. Направленность каналов вперед и назад позволяет исследовать каждое скопление аэрозоля при разных углах наблюдения, что дает возможность определения фазовой функции рассеяния аэрозоля и корректного вычисления оптической толщи облаков как в южном, так и в северном полушарии. Каналы наблюдения, направленные в разные стороны, резко увеличивают количество сканов атмосферы, которые делает спутник в течение дня, а также расширяют список возможно используемых орбит вплоть до орбиты МКС: канал, направленный в сторону от вектора движения спутника, расширяет зону наблюдения на тысячи километров. Основным оптическим элементом прибора является центральное конусовидное зеркало, которое фокусирует свет от разнонаправленных каналов на одной матрице. Такой лимбовый микроспутник может наблюдать болиды и на Марсе, а также у других небесных тел с атмосферой.

Актуальность нового вида лимбового сенсора связана и с тем, что он может заменить собой лимбовый сенсор Suomi, который проработал на орбите уже шесть лет, превысив ожидаемый срок службы. На спутнике JPSS-1, который был запущен в конце 2017 г. на замену спутника Suomi, лимбовый сенсор не установлен. Он будет размещен только на следующем спутнике серии (JPSS-2), до запуска которого осталось несколько лет. Тем самым, непрерывный срок лимбовых наблюдений, которые имеют уникальный характер, может прерваться. Кроме того, лимбовый сенсор, установленный на Suomi, обладает конструкционным недостатком, который заключается в том, что к ожидаемому сигналу, например, к излучению голубого неба из-за рэлеевского рассеяния, подмешивается посторонний сигнал солнечного спектра. Это явление, впервые обнаруженное автором в 2013 г., хорошо видно на илл. 117 из статьи Горькавого (2016), которая показывает, как меняется с высотой атмосферы регистрируемое отношение красного к зеленому участку спектра: концентрация аэрозоля, рассеяние на котором придавало атмосфере красноватый оттенок, падает с ростом высоты, и атмосфера становится все голубее. Болидное облако, появившись на больших высотах, закономерно вызывает локальное покраснение сигнала. Но одновременно на больших высотах появляется глобальное покраснение атмосферы, которое увеличивается с высотой и становится особенно сильным в конце орбиты, на высотах более 55 км. Этот артефакт наблюдений чуть не уничтожил слабый сигнал от Челябинского болида на высоте 67 км. К сожалению, этот феномен долго игнорировался, и лимбовые данные Suomi до сих пор не очищены от этой паразитной засветки. Как показано автором в докладе на семинаре группы OMPS Suomi от 10 августа 2017 г. на примере орбитальных тестов, в которых был открыт только правый канал наблюдения, причиной такой засветки

является проникновение света из одного канала в соседние, вернее, в те участки матрицы, которые обслуживают другие каналы. Предлагаемый лимбовый сенсор нового типа должен быть свободен от таких конструкционных проблем.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Существующий лимбовый сенсор LP/OMPS спутника Suomi способен фиксировать следы от болидов с энергией в десятые доли килотонн. Таким образом, лимбовые сенсоры могут быть полезны для оценки популяции околоземных астероидов размером более метра. Болидные облака, наблюдаемые Suomi, достаточно хорошо коррелируют с каталогом болидов (Fireballs Reported by US Government Sensors, JPL/NASA). Часть регистрируемых Suomi болидов не отмечена в этом каталоге, то есть новый метод может быть важным дополнением к нему. Для других планет (или спутников) с атмосферой, где нет развитой системы сенсоров, новый метод наблюдения болидных облаков окажется особенно полезным и дающим достаточно полную информацию о популяции мелких тел вокруг планеты.

Преимущество лимбового сенсора для наблюдения болидов связано с тем, что облако, возникшее после взрыва болида, сохраняется продолжительное время, поэтому требования к наблюдательному покрытию резко снижаются. Облако обычно растягивается ветровым переносом, что уменьшает его контраст, зато повышает вероятность быть обнаруженным. На основе опыта работы с лимбовым сенсором Suomi, можно предложить спектрально упрощенный лимбовый сенсор, который способен более эффективно регистрировать болидные облака. Важным обстоятельством является то, что такой сенсор относится к категории дешевых “кубсатов”, весом всего в несколько килограмм. При этом оптимальным вариантом будет поддержание на орбитах нескольких таких спутников, что обеспечит лучшие условия сканирования. Следовательно, спутники, запущенные из разных стран и на разные орбиты, будут не конкурировать, а дополнять данные друг друга. Марсианский орбитальный модуль, снабженный таким инструментом, даст важную информацию о распределении мелких астероидов возле Марса.

Автор выражает благодарность группе спутника Suomi за данные, использованные в этом исследовании.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Барабанов С.И., Болгова Г.Т., Микиша А.М., Смирнов М.А. Обнаружение крупных тел в метеорных потоках за пределами земной атмосферы // Письма в Астрон. журн. 1996. Т. 22. № 12. С. 945–949.

Барабанов С.И., Смирнов М.А. Анализ содержания крупных тел в метеорных и болидных роях // Астрон.

вестн. 2005. Т. 39. № 3. С. 263–275. (Barabanov S.I., Smirnov M.A. An Analysis of the Content of Large Bodies in Meteor and Fireball Streams // Sol. Syst. Res. 2005. V. 39. № 3. P. 231–238.)

Горькавый Н.Н. Пылевое кольцо вокруг Земли, названное Челябинским суперболидом // Челябинский суперболид / Ред. Горькавый Н.Н., Дудоров А.Е. Челябинск: Изд-во Челяб. гос. ун-та, 2016. С. 132–147.

Горькавый Н.Н., Лухарев Д.С., Миннибаев Д.Н. Цветовые вариации аэрозольного следа Челябинского болида // Метеорит Челябинск – год на Земле / Ред. Антипин Н.А. Челябинск. 2014. С. 118–123.

Горькавый Н.Н., Тайдакова Т.А., Проворникова Е.А., Горькавый И.Н., Ахметвалеев М.М. Аэрозольный шлейф Челябинского болида // Астрон. вестн. 2013. Т. 47. № 4. С. 299–303. (Gorkavyi N.N., Taidakova T.A., Provornikova E.A., Gorkavyi I.N., Akhmetvaleev M.M. Aerosol plume after the Chelyabinsk bolide // Sol. Syst. Res. 2013. V. 47. № 4. P. 275–279.)

Челябинский суперболид / Ред. Горькавый Н.Н., Дудоров А.Е. Челябинск. Изд-во Челяб. гос. ун-та, 2016. 223 с.

Brown P.G., Assink J.D., Astiz L., Blaauw R., Boslough M.B., Borovička J., Brachet N., Brown D., Campbell-Brown M., Ceranna L., Cooke W., de Groot-Hedlin C., Drob D.P., Edwards W., Evers L.G., Garces M., Gill J., Hedlin M., Kingery A., Laske G., Le Pichon A., Mialle P., Moser D.E., Saffer A., Silber E., Smets P., Spalding R.E., Spurný P., Tagliaferrì E., Uren D., Weryk R.J., Whittaker R., Krzeminski Z. 500-kiloton airburst over Chelyabinsk and an enhanced hazard from small impactors // Nature. 2013. V. 503. P. 238–241.

DeLand M., Colarco P., Kowalewski M., Gorkavyi N., Ramos-Izquierdo L. Development of the Multi-Angle Stratospheric Aerosol Radiometer (MASTAR)/ ESTO Forum. Pasadena, CA. June 12–15 2017. https://esto.nasa.gov/forum/estf2017/presentations/Gorkavyi_Deland_A2P2_ESTF2017.pdf.

Fireballs Reported by US Government Sensors. JPL/NASA. <https://cneos.jpl.nasa.gov/fireballs/>.

Gorkavyi N., Rault D.F., Newman P.A., da Silva A.M., Dudorov A.E. New stratospheric dust belt due to the Chelyabinsk bolide // Geophys. Res. Letters. 2013. V. 40. P. 4728–4733.

Popova O.P., Jenniskens P., Emel'yanenko V., Kartashova A., Biryukov E., Khaibrakhmanov S., Shuvalov V., Rybnov Yu., Dudorov A., Grokhovsky V.I., Badyukov D.D., Yin Q.-Z., Gural P.S., Albers J., Granvik M., Evers L.G., Kuiper J., Kharlamov V., Solovyov A., Rusakov Yu.S., Korotkiy S., Serdyuk I., Korochantsev A.V., Larionov M.Yu., Glazachev D., Mayer A.E., Gisler G., Gladkovsky S.V., Wimpenny J., Sanborn M.E., Yamakawa A., Verosub K.L., Rowland D.J., Roeske S., Botto N.W., Friedrich J.M., Zolensky M.E., Le L., Ross D., Ziegler K., Nakamura T., Ahn I., Lee J.I., Zhou Q., Li X.-H., Li Q.-L., Liu Y., Tang G.-Q., Hiroi T., Sears D., Weinstein I.A., Vokhmintsev A.S., Ishchenko A.V., Schmitt-Kopplin Ph., Hertkorn N., Nagao K., Haba M.K., Komatsu M., Mikouchi T., the Chelyabinsk Airburst Consortium. Chelyabinsk Airburst, Damage Assessment, Meteorite Recovery and Characterization // Science. 2013. V. 342. № 6162. P. 1069–1073.

Williams G.V. 2014 AA. M.P.E.C. 2014-A02. <https://minorplanetcenter.net/mpec/K14/K14A02.html>.