

УДК 523.31-852;520.6

ЛИМБОВЫЕ КОСМИЧЕСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ ИСКУССТВЕННЫХ АЭРОЗОЛЬНЫХ ОБЛАКОВ

© 2020 г. Н. Н. Горькавый*

Крымская астрофизическая обсерватория РАН, Крым, Россия

*nickgorkavyi@gmail.com

Поступила в редакцию 16.10.2018 г.

После доработки 30.07.2019 г.

Принята к публикации 19.09.2019 г.

Лимбовый сенсор LP/OMPS спутника *Suomi* (NASA/NOAA) обладает высокой чувствительностью к наличию аэрозоля в стратосфере и мезосфере на высотах до 15 до 90 км и легко регистрирует, в частности, аэрозольный слой Юнге, а также стратосферные и мезосферные полярные облака и атмосферные следы крупных болидов. В настоящей статье рассматриваются случаи наблюдения лимбовым сенсором *Suomi* аэрозольных следов, которые оставляют на высотах 30–65 км взлетающие ракеты. В ряде случаев аэрозольный след ракеты отслеживался в течение нескольких дней, что позволяет использовать такие облака как маркеры для анализа ветрового переноса в стратосфере. Иногда наблюдались облака не только возле точки старта, но и на значительном расстоянии от нее, в направлении взлета спутника. За этот феномен может отвечать баллистический перенос аэрозольных облаков: частицы несгоревшего топлива ракеты-носителя, образующиеся на высотах ~100 км, обладают скоростью, меньшей, чем первая космическая, но достаточной, чтобы облако прошло по суборбитальной траектории и снова вернулось в атмосферу на расстоянии в тысячи километров от космодрома. Эффективность наблюдений аэрозольных облаков, как естественных, так и искусственных, может быть увеличена с помощью лимбового сенсора с большим количеством точек наблюдения, распределенных по всему горизонту.

DOI: 10.31857/S0023420620020041

ВВЕДЕНИЕ

Орбитальная геофизическая обсерватория (OGO4), запущенная NASA в 1967 г., обнаружила аномальное свечение в верхней атмосфере в линии Лайман-альфа 121.6 нм, которое было связано с запуском ракеты-носителя Atlas [1]. Всего в данных этой космической обсерватории было обнаружено два десятка сигнала на высотах более 100 км от взлетающих советских и американских ракет (регистрация происходила после старта в интервале от 6 мин до 10 ч, когда облако водорода еще не рассеялось) [1]. Кроме следов стартующих ракет, исследователи нашли признаки сброса горючего в космическом пространстве – в течение первых трех витков беспилотного корабля *Аполлон-6*, который был запущен 4.IV.1968 и испытывал проблемы с работой двигателей и с утечкой топлива [1].

Взлетающие шаттлы выбрасывают 300–350 т водяного пара на высотах 100–115 км, что приводит к образованию следа длиной около тысячи километров. Такой вброс оказывает на атмосферу заметное влияние. После запуска шаттла *Endeavour* (экспедиция SST-118), 8.VIII.2007 ученые зафиксировали слои ионов железа и водяного пара

в приполярной области, а несколько позже наблюдались необычно сильные полярные мезосферные облака [2]. Измерения проводились тремя лидарами, двумя радарными и оптической камерой на высотах от 80 до 120 км [2]. Исследователи отметили необычно быстрое распространение облаков пара в приполярную область [2]. Этот же феномен наблюдался при стартах шаттлов с 2002 по 2007 г. по спектральным данным космических сенсоров на спутнике *TIMED* [3, 4]. Исследователи, изучая перенос газов, образовавшихся при стартах шаттлов, пришли к выводу, что в термосфере существуют аномальные ветра свыше 100 м/с, и отметили необходимость дальнейшего изучения этого феномена [3, 4]. Отметим, что след взлетевшей ракеты с Байконура был зарегистрирован с самолета над калифорнийским побережьем [5]. Достаточно свежий обзор данных о регистрации космическими и авиационными сенсорами следов ракетных запусков в атмосфере до 2013 г. можно найти в работе [6].

Лимбовый сенсор спутника *Suomi*, запущенного в конце 2011 г. и двигающегося по солнечно-синхронной орбите, ведет наблюдение на дневной стороне планеты одновременно тремя каналами,

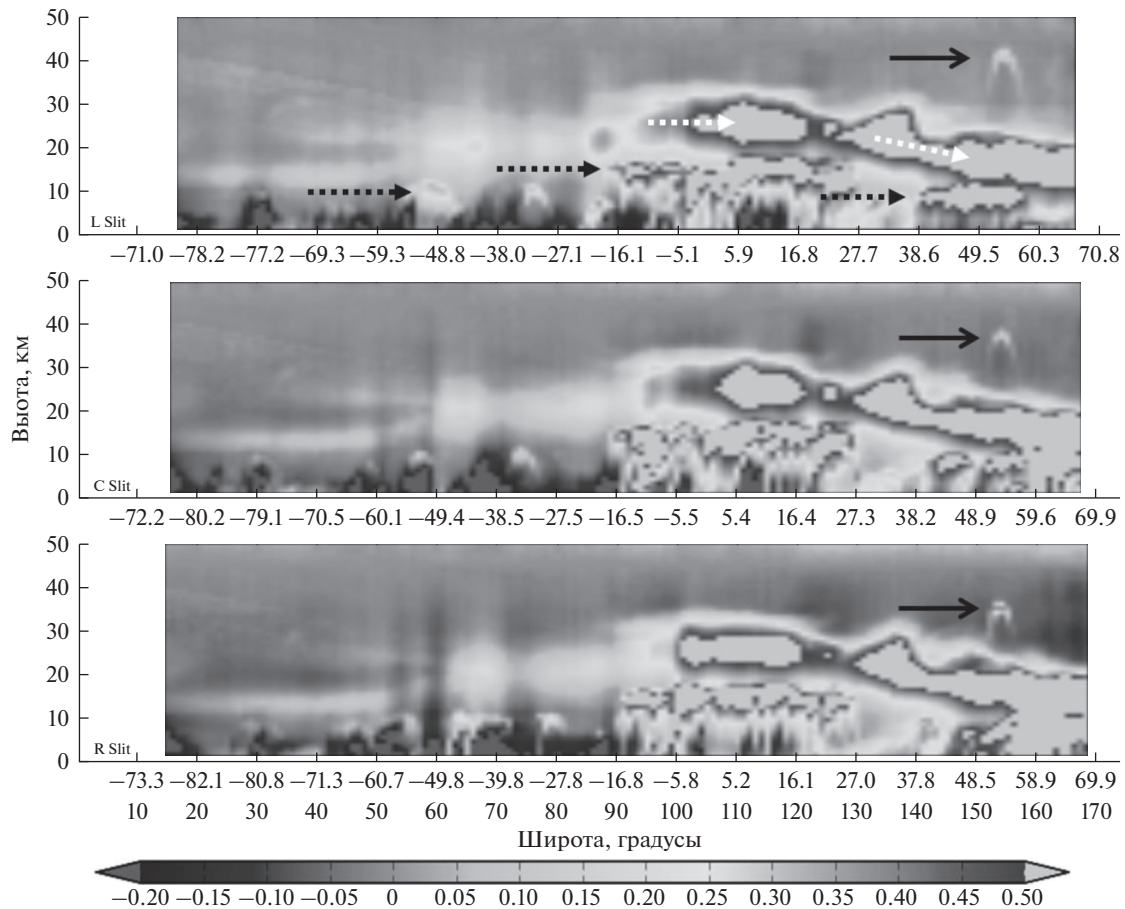


Рис. 1. Аэрозольный индекс для 674 нм из данных LP/OMPS *Suomi* для орбиты 10582 от 12.XI.2013. Сверху вниз: данные левого, центрального и правого каналов наблюдения. Штрихованными белыми стрелками показаны самые плотные части стратосферного аэрозольного слоя Юнге, соответствующие правой части шкалы плотности; штрихованными черными стрелками показаны тропосферные облака. Сплошные стрелки указывают на аэрозольное облако, оставшееся после взлета ракеты *Протон* с космодрома Байконур. Данные NASA/NOAA/SSAI.

точки наблюдения которых разнесены по земной поверхности на 250 км. Каждый канал получает спектр свечения атмосферы по высоте от 0 до 80 км с шагом в 1 км и в 180 точках с интервалом по широте примерно в градус, начиная с южной полярной области до северных высоких широт (рис. 1). Рис. 1 показывает аэрозольный индекс рассеяния как функцию широты (или номера точки съемки) и высоты. Этот индекс равен натуральному логарифму отношения между наблюдаемым свечением атмосферы на длине волны 674 нм и теоретическим значением этого свечения, вычисленным без учета аэрозоля. Аэрозольные облака из субмикронных частиц хорошо рассеивают солнечный свет и усиливают наблюдаемое свечение по сравнению с теоретически ожидаемым. Рис. 1 представляет собой черно-белый вариант цветного оригинала (примеры цветного распределения аэрозольного индекса — см. [7]), поэтому часть информации утрачивается. Но следы взлета ракет видны отчетливо и на черно-белой картинке.

Из-за разных фазовых углов рассеяния, лимбовый сенсор чувствительнее к аэрозолю в северном полушарии, поэтому на рис. 1 атмосфера южного полушария выглядит более прозрачной. Для более адекватной картины нужно вводить поправку на фазовую функцию атмосферного аэрозоля, которая плохо известна. Аркообразная форма локальных облаков на рис. 1 связана с особенностями лимбовых наблюдений, которые регистрируют облако в течение нескольких минут на разном видимом расстоянии от земной поверхности. Широта и высота облака слабо меняются за эти минуты, но сенсор приписывает облаку разные широты и высоты, что и приводит к появлению арки. Истинные высота и широта облака соответствуют точке максимальной высоты арки.

На рис. 1 можно увидеть аэрозольный слой Юнге и более низкие тропосферные облака (заметный слой чистой атмосферы между ними — это граница между тропосферой и стратосферой). За исключением стратосферных и мезосферных

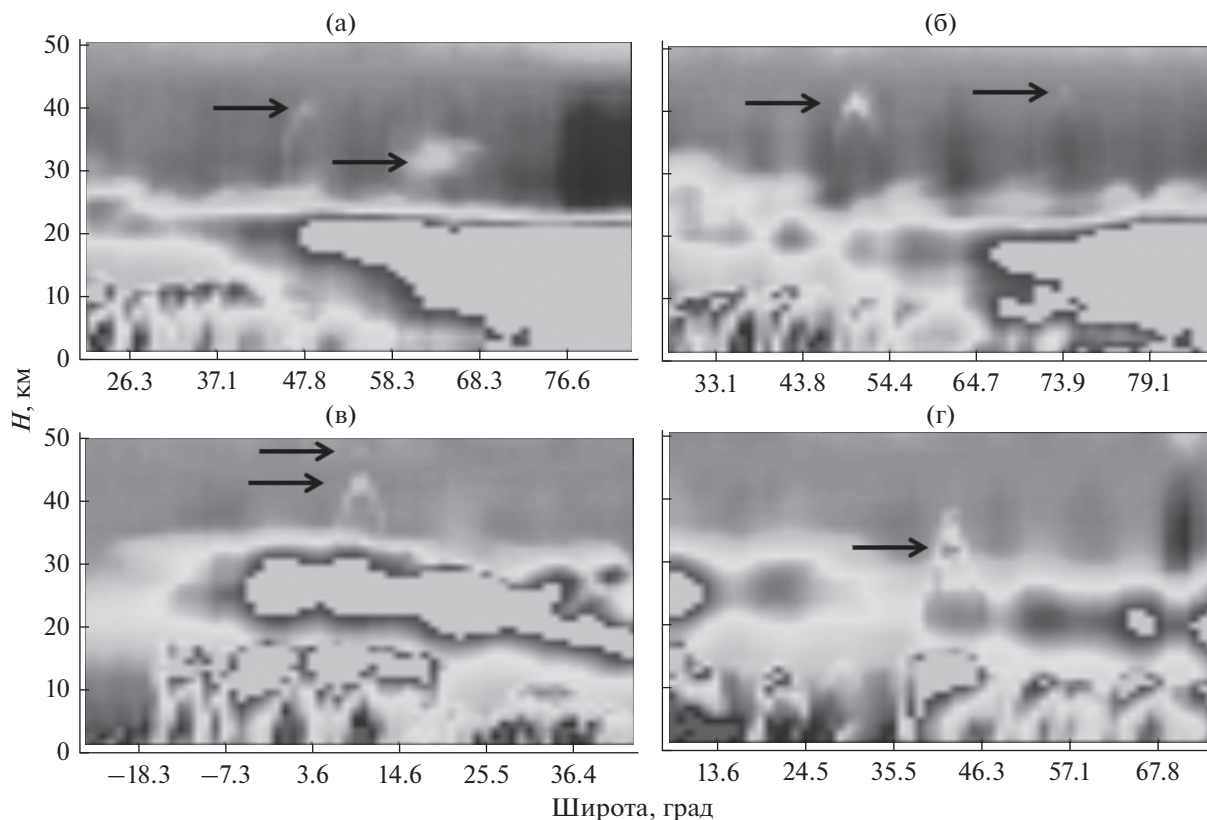


Рис. 2. Аэрозольный индекс для 674 нм из данных LP/OMPS *Suomi* для орбит 7319 (а), 2879 (б), 10696 (в) и 19243 (г). Сплошные стрелки указывают на аэрозольные облака, оставшиеся после взлета ракет (за исключением части (а), где облако на 64° с.ш. оставлено Челябинским суперболидом).

полярных облаков, в зоне над слоем Юнге, то есть на высотах более 30–35 км не должно быть никаких облаков. На средних широтах здесь можно встретить только следы болидов и ракет. Челябинский суперболид от 15.II.2013, весом более десяти тысяч тонн, стал самым значительным болидом после Тунгусского [8, 9]. Лимбовый сенсор *Suomi* наблюдал аэрозольное облако, оставленное этим болидом в течение трех месяцев [7, 10]. Как выяснилось при детальном изучении данных лимбового сенсора, он регистрирует каждый год несколько аэрозольных облаков, оставленных меньшими болидами [11].

1. НАБЛЮДЕНИЯ РАКЕТНЫХ АЭРОЗОЛЬНЫХ ОБЛАКОВ

Ракета-носитель *Протон-М* стартовала 11.XI.2013 в 23.46 (здесь и далее мы указываем время по Гринвичу) с Байконура. Через шесть часов после взлета *Протона*, лимбовый сенсор спутника *Suomi* одновременно всеми тремя каналами наблюдения зафиксировал вытянутое с запада на восток более чем на 500 км облако аэрозоля (см. рис. 1). Левый канал обнаружил облако на высоте 40–45 км в точке с координатами 54.9° с.ш. и

104.9° в.д.; центральный канал сделал срез облака в точке с координатами 54.3° с.ш. и 101.2° в.д. и измерил его высоту как 35–40 км; правый (самый западный канал) нашел самую яркую и низкую часть облака на высоте 30–35 км в точке с координатами 53.7° с.ш. и 97.6° в.д. (см. рис. 1, где аэрозольные облака от ракетных двигателей отмечены стрелками). Значительный снос и растяжение аэрозольного облака связаны с сильными ветрами в стратосфере. Например, снос пылевого облака от Челябинского суперболида происходил со скоростью 85 м в секунду [10]. Скорость сноса облака от старта *Протона* близка к 100 м/с, что в пределах ожидаемых значений для данных высот, но нельзя исключить влияние быстрого баллистического переноса, который будет обсуждаться ниже.

Сразу два стратосферных аэрозольных облака — ракетное и болидное — зафиксировал лимбовый сенсор *Suomi* на орбите 7319 от 27.III.2013 в 5.15 всеми тремя сенсорами. На рис. 2а приведен фрагмент данных правого сенсора, где слева отмечено облако в точке 49.2° с.ш. и 97.0° в.д., появившееся в результате старта *Протон-М* с Байконура 26.III.2013 г. в 19.07, а справа (в точке 63.8° с.ш. и 86.3° в.д.) — уже значительно рассеяв-

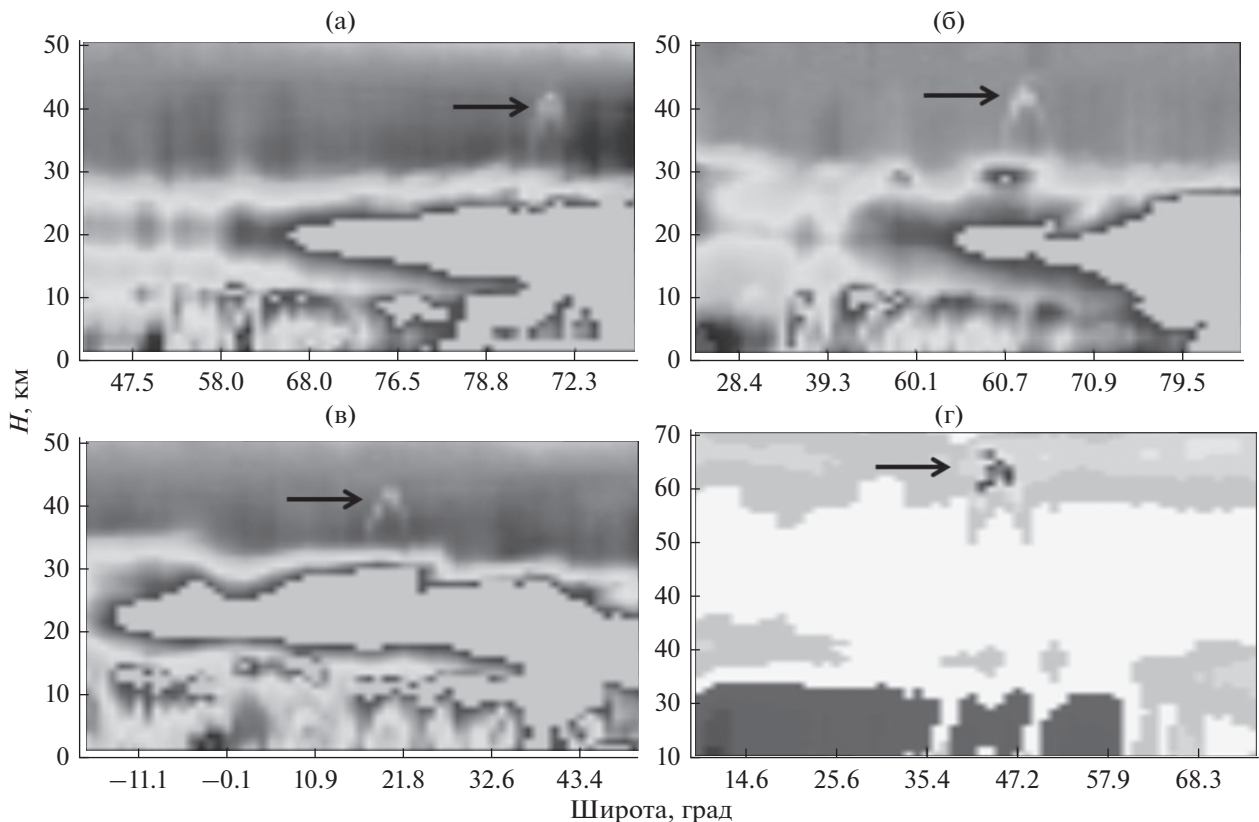


Рис. 3. Аэрозольные индексы для 674 нм (а, б, в) и 353 нм (г) из данных LP/OMPS *Suomi* для орбит 18937 (а), 23336 (б), 16093 (в) и 14602 (г). Сплошные стрелки указывают на аэрозольные облака, оставшиеся после взлета ракет.

шееся пылевое кольцо, оставленное в атмосфере Земли Челябинским болидом 15.II.2013.

На орбите 2879 (правый канал лимбового сенсора) спутник *Suomi* 5.V.2012 в 6.30 тоже зафиксировал сразу два облака в точках 51.6° с.ш. и 78.3° в.д. и 74.2° с.ш. и 48.5° в.д., на типичных высотах 40–45 км – см. рис. 2б. Эти облака, вероятнее всего, были оставлены при запусках накануне: *Протона* с Байконура, в 19.12 и *Союза* в 14.05 из Плесецка. Для уверенности, что данное облако оставлено ракетой, а не болидом, мы проверяем данные болидного каталога NASA (<https://cneos.jpl.nasa.gov/fireballs/>) – нет ли в это время в данном полушарии заметных болидов.

На рис. 2в, который представляет собой фрагмент данных лимбового сенсора с орбиты 10 696 (левый канал) от 20.XI.2013, полученных в 5.49, показано облако, оставленное на высотах 42–48 км в точке 10.2° с.ш. и 104.7° в.д.) китайской ракетой *Long March 4C*, стартовавшей в 3.31 с космодрома с координатами 38.9° с.ш. и 111.6° в.д. Отметим, что высота 45 км является нормировочной высотой для аэрозольного индекса, что вызывает исчезновение любых облаков на этой высоте – см. рис. 2в. 15.VII.2015 в 15.36 с мыса Канаверал (28.5° с.ш. и 80.5° з.д.) стартовала ракета *Atlas*. Че-

рез полтора часа, лимбовый сенсор при пролете на орбите 19243 (левый канал) зафиксировал мощное аэрозольное облако в точке 43.1° с.ш. и 58.9° з.д. на высоте 30–35 км – см. рис. 2г.

2. ПРОДОЛЖИТЕЛЬНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ РАКЕТНЫХ ОБЛАКОВ

Обычно аэрозольное облако после старта ракеты наблюдается однажды, в течение нескольких часов после старта, но в некоторых случаях облако удается отследить в течение нескольких дней. Так, 23.VI.2015 в 16.44 ракета *Союз* стартовала из Плесецка. 24.VI в 3.12 спутник *Suomi* на орбите 18937 (правый канал) зафиксировал облако в точке с координатами 74.8° с.ш. и 11.7° в.д. на высоте 40 км (см. рис. 3а). Приведем некоторые данные о диапазоне коэффициента экстинкции (оптической толща на километр вдоль луча зрения), регистрируемого лимбовым сенсором спутника *Suomi* для ракетных аэрозольных облаков. Для яркого облака, оставленного ракетой *Atlas* на орбите 19243 (см. рис. 2г), измеренный коэффициент экстинкции достигал значения в 0.4 км^{-1} . Слабое облако, зарегистрированное на орбите 18937, имело коэффициент экстинкции $1.5 \cdot 10^{-6} \text{ км}^{-1}$, что все

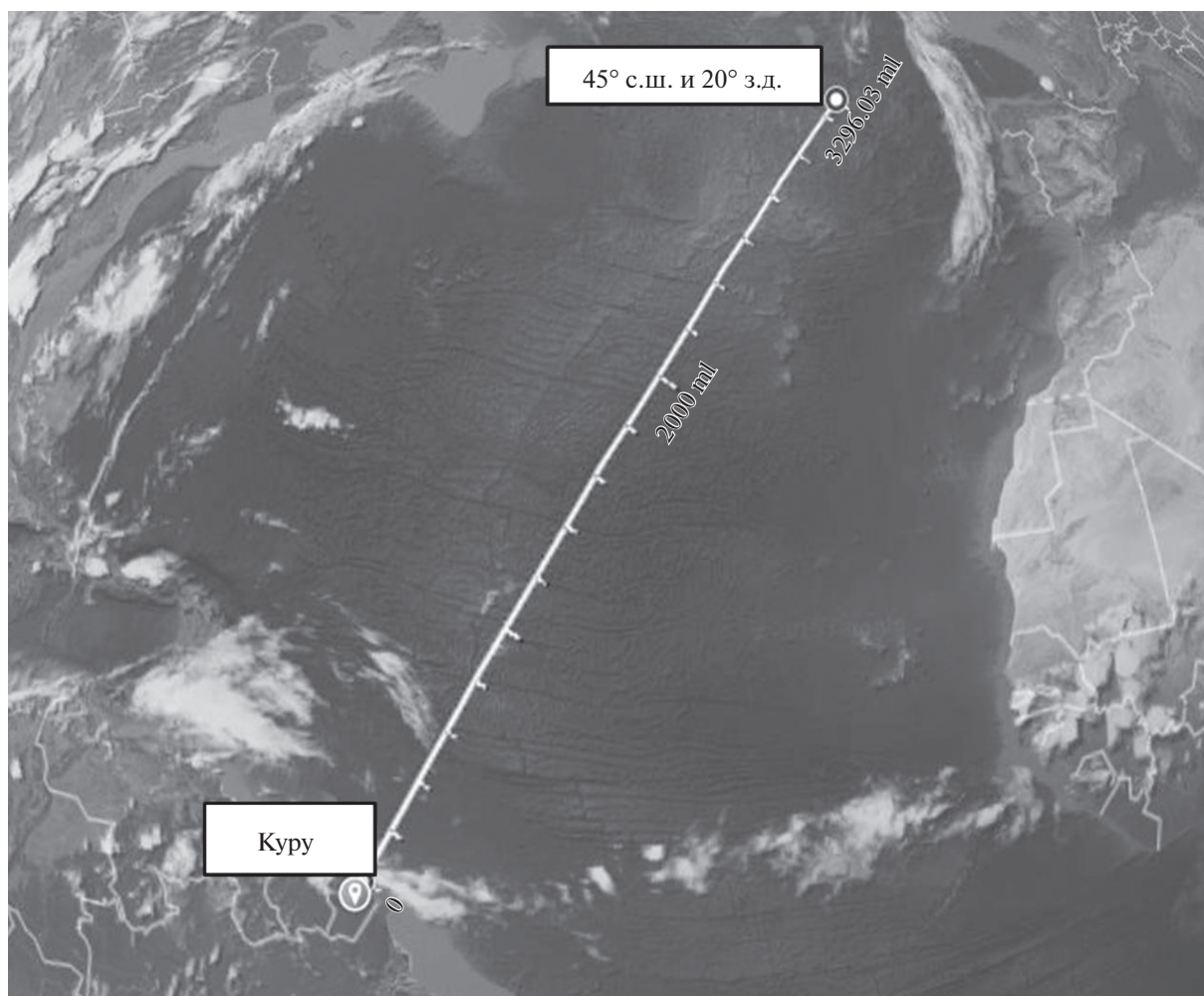


Рис. 4. Расположение точки старта ракеты *Союз* 22.VIII.2014 из космодрома Куру и аэрозольного облака, обнаруженного спустя 110 мин на расстоянии свыше пяти тыс. км. Карта и измерение расстояния (в милях) – Google Maps.

равно было значительно больше фонового значения. Это облако оказалось долгоживущим и двигающимся в западном направлении. Оно фиксировалось в течение пяти дней, на орбитах 18941, 18952, 18967 (двумя каналами), 18968, 18998 (двумя каналами). В последний раз слабый след этого облака был обнаружен двумя каналами в 10.55 28.VI.2015 над канадским островом Виктория в точках с координатами 71.6° с.ш. и 105.9° з.д., а также 72.0° с.ш. и 113.6° з.д. Таким образом, за 114 часов наблюдений облако от ракетного выхлопа преодолело Атлантику, Гренландию и северную часть Канады, пролетев около 4.5 тыс. км с примерной скоростью около 10 м/с. Эта скорость ветра очень умеренна для стратосферы, что, возможно, и послужило причиной долгого сохранения облака.

28.IV.2016 в 02.01 стартовала ракета-носитель *Союз* из космодрома “Восточный” (координаты 52° с.ш. и 128° в.д.). 29.IV в 4.58 спутник *Suomi* на орбите 23336 (правый канал) зафиксировал обла-

ко в точке с координатами 63.8° с.ш. и 109.0° в.д. на характерной высоте 40 км (см. рис. 3б). Облако отслеживалось в течение 6 дней, на орбитах 23365 (два канала), 23380, 23409. В последний раз облако было зарегистрировано 4.V.2016 в 8.29 в точке с координатами 71.3° с.ш. и 47.3° в.д. над Баренцевым морем. Таким образом, за 150 ч наблюдения облако, двигаясь на северо-запад, пересекло Дальний Восток и Сибирь, преодолев расстояние примерно 3.5 тыс. км со скоростью 6–7 м/с. Это тоже весьма небольшая скорость для стратосферного ветра, что замедлило скорость расплывания облака.

3. НАБЛЮДЕНИЕ БАЛЛИСТИЧЕСКОГО ПЕРЕНОСА АЭРОЗОЛЬНЫХ ОБЛАКОВ

Как минимум, в двух случаях наблюдался феномен баллистического переноса аэрозольных облаков в космическом пространстве.

5.XII.2014 в 12.05 был осуществлен запуск ракеты *Delta* с мыса Канаверал. Спустя 4 часа 20 мин спутник *Suomi* на орбите 16093 центральным и правым каналом зафиксировал облако на высоте 40–43 км в двух точках с координатами около 20° с.ш. и западными долготами в 46° (см. рис. 3в для центрального канала) и 49°. Расстояние между местом старта и точками обнаружения облаков составило 3600 км. Ветер, который мог осуществить такой перенос облака, должен был обладать скоростью свыше 800 км/ч или более 200 м/с, что не представляется реалистичным.

22.VIII.2014 в 12.27 был запущен *Союз* с космодрома Куру (5.3° с.ш. и 52.8° з.д.) для вывода двух навигационных европейских спутников *Galileo* на орбиту с наклоном 56 градусов, то есть, ракета взлетела на северо-восток. Через 1 ч и 50 мин., в 14.17 спутник *Suomi* на орбите 14602 центральным каналом зафиксировал облако на высоте 64–67 км в точке с координатами 45° с.ш. и 20° з.д. (см. рис. 3г и рис. 4). Расстояние между космодромом и точкой обнаружения облака составило свыше 5200 км (гипотетический ветер для такого переноса должен иметь скорость в 2800 км/час или около 800 м/с, что значительно превышает скорость звука). Отметим, что, согласно каталогу [12], в земной атмосфере не было зарегистрировано никаких болидов в течение месяца до старта *Союза* (в северном полушарии – в течение двух месяцев).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Лимбовый сенсор LP/OMPS спутника *Suomi* способен фиксировать аэрозольные следы от старта крупных космических ракет. Обнаружен новый, ранее неизвестный феномен баллистического переноса облаков аэрозоля, возникающих при работе двигателей ракеты-носителя. Это полезно для изучения ветрового переноса аэрозоля и анализа эффективности работы космических двигателей в реальных условиях. Учитывая опыт работы с лимбовым сенсором *Suomi*, можно предложить лимбовый сенсор, который, благодаря большому количеству наблюдательных каналов и их расположению, способен эффективнее регистрировать аэрозольные облака [12]. Такой сенсор, работающий в 2–3 длинах волн, можно изготовить для спутника-“кубсата” весом в несколько килограмм. Поддержание флотилии из нескольких таких спутников обеспечит оптимальные условия сканирова-

ния атмосферы и наблюдения естественных и искусственных аэрозольных облаков.

Автор выражает благодарность группе спутника *Suomi* за данные, использованные в этой статье.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hicks G.T., Chubb T.A., Meier R.R. Observations of hydrogen Lyman alpha emission from missile trails // JRL. 1999. V.104. A5. P. 10101–10109.
2. Kelley M.C., Nicolls M.J., Varney R.H. et al. Radar, lidar, and optical observations in the polar summer mesosphere shortly after a space shuttle launch // JRL. 2010. V. 115. A05304.
3. Niciejewski R., Skinner W., Cooper M. et al. Verification of large-scale rapid transport in the lower thermosphere: Tracking the exhaust plume of STS-107 from launch to the Antarctic // JRL. 2011. V. 116. A05302.
4. Meier R.R., Stevens M.H., Plane J.M.C. et al. A study of space shuttle plumes in the lower thermosphere // JRL. 2011. V. 116. A12322.
5. Newman P.A., Wilson J.C., Rossa M.N. et al. Chance encounter with a stratospheric kerosene rocket plume from Russia over California // Geophys. Res. Lett. 2001. V. 28. P. 959.
6. Voigt Ch., Schumann U., Graf K., Gottschaldt K.-D. Impact of rocket exhaust plumes on atmospheric composition and climate – an overview // Progress in Propulsion Physics. 2013. V. 4. P. 657–670.
7. Челябинский суперболид / Под ред. Горькавого Н.Н., Дудорова А.Е. Челябинск: Издательство Челяб. гос. ун-та, 2016.
8. Brown P.G., Assink J.D., Astiz L. et al. 500-kiloton airburst over Chelyabinsk and an enhanced hazard from small impactors // Nature. 2013. V. 503. P. 238–241.
9. Popova O.P., Jenniskens P., Emel'yanenko V. et al. The Chelyabinsk Airburst Consortium. Chelyabinsk Airburst, Damage Assessment, Meteorite Recovery and Characterization // Science. 2013. V. 342. № 6162. P. 1069–1073.
10. Gorkavyi N., Rault D.F., Newman P.A. et al. New stratospheric dust belt due to the Chelyabinsk bolide // Geophys. Res. Letters. 2013. V. 40. P. 4728–4733.
11. Gorkavyi N., DeLand M., Bhartia P.K. Limb Profiler of OMPS/NPP and registration of plumes from bolides and rockets. GSFC/NASA. Kaufman Symposium, June 21–23, 2016.
12. DeLand M., Colarco P., Kowalewski M. et al. Development of the Multi-Angle Stratospheric Aerosol Radiometer (MASTAR). ESTO Forum, Pasadena, CA, June 12–15, 2017.