

УДК 528.813:629.78

АЭРОЗОЛЬНЫЙ СЛОЙ НИЖНЕЙ ТЕРМОСФЕРЫ: I. НАБЛЮДЕНИЕ НА ФОНЕ ЛИМБА ЗЕМЛИ

© 2023 г. А. Н. Беляев^{1, *}, С. Ш. Николайшвили^{1, **}, А. Н. Омельченко^{1, ***}, А. Ю. Репин^{1, ****},
М. А. Полуаршинов^{2, *****}, Ю. В. Смирнов^{2, *****}, А. В. Страхов^{3, *****},
А. Г. Батищев^{5, *****}, В. И. Стасевич^{3, *****}, Ю. В. Платов^{4, *****}

¹Институт прикладной геофизики им. акад. Е.К. Фёдорова (ИПП), Москва, Россия

²Ракетно-космическая корпорация “Энергия” им. С.П. Королёва (РКК “Энергия”),
Королёв (Московская обл.), Россия

³Научно-производственное предприятие “Робис” (НПП “Робис”),
Москва, Россия

⁴Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн
им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН), Москва, Троицк, Россия

⁵Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ” (НИЯУ МИФИ),
Москва, Россия

*e-mail: an52@mail.ru

**e-mail: ser58ge@gmail.ru

***e-mail: alexom@mail.ru

****e-mail: repin_a_yu@mail.ru

*****e-mail: mikhail.polarshinov@rsce.ru

*****e-mail: yury.v.smirnov@rsce.ru

*****e-mail: lexand@robis.ru

*****e-mail: alexey-batshev@mail.ru

*****e-mail: walter@robis.ru

*****e-mail: yplatov@mail.ru

Поступила в редакцию 24.01.2023 г.

После доработки 17.02.2023 г.

Принята к публикации 28.03.2023 г.

В ходе космического эксперимента “Терминатор” с борта Международной космической станции в нижней термосфере была зарегистрирована слоистая оптическая структура. Наблюдения проводились в видимом (540 нм) и ближнем инфракрасном (700 нм и 830 нм) диапазонах спектра. Приводится краткое описание используемой научной аппаратуры. Излагаются результаты обработки полученных изображений, позволившие считать их изображениями аэрозольного слоя, имеющего протяженность планетарного масштаба. Рассматриваются возможные варианты происхождения данного аэрозольного образования.

DOI: 10.31857/S0016794023600400, EDN: OUCQJQ

1. ВВЕДЕНИЕ

Визуальные наблюдения различных эмиссионных и рассеивающих солнечный свет слоистых атмосферных структур (САС) с пилотируемых космических аппаратов проводятся с семидесятих годов прошлого века. Первые фотографии этих слоев были получены на станции “Салют 7” в начале 1980-х гг. [Koutchmy and Nikolsky, 1983; Никольский и др., 1987; Платов и др., 1989]. В дальнейшем сравнение данных, полученных на космических аппаратах, с результатами наземных и ракетных измерений свечения ночного неба

позволило отождествить наблюдаемые в ночной атмосфере светящиеся слои с областями характерных атмосферных эмиссий [Краснопольский, 1987; Шефов и др., 2006; Семёнов и Платов, 2008]. К наиболее интенсивным ночным эмиссиям относятся: полосы Мейнела гидроксидов ОН ($\lambda = 500\text{--}3000$ нм, $h_{\max} \approx 87$ км, суммарная интенсивность полос $I \approx 5$ МРл), зеленая линия атомарного кислорода ($\lambda = 557.7$ нм, $h_{\max} \approx 96$ км, $I \approx 100$ Рл), а также свечение молекулярного кислорода — полосы Герцберга ($\lambda = 250\text{--}290$ нм, $h_{\max} \approx 96$ км, $I \approx 600$ Рл), атмосферная ($\lambda = 762$ (полоса 0-0) и

864 нм (полоса 0-1), $h_{\max} \approx 95$ км, $I \approx 5-10$ кРл) и инфракрасная атмосферная системы ($\lambda = 1.27$ (0-0) и 1.58 мкм (0-1), $h_{\max} \approx 90$ км, $I \approx 100$ кРл)), а также свечение натрия. Наряду с вышеупомянутыми дискретными эмиссиями, в спектре атмосферного свечения в ультрафиолетовом, видимом и инфракрасном спектральных диапазонах присутствует непрерывная спектральная компонента (так называемый континуум), регистрируемая в интервале высот от 70 до 130 км [Гурвич и др., 2002]. Природа этого излучения до настоящего времени остается не ясной [Шефов и др., 2006].

К рассеивающим солнечный свет слоистым атмосферным структурам относят мезосферные серебристые облака (МСО), которые появляются в верхней мезосфере (75–90 км) в приполярных областях летнего полушария. Наиболее благоприятные условия для наземных наблюдений МСО складываются в сумерках, при погружении Солнца под горизонт на $6^\circ-12^\circ$. В это время его лучи оставляют в тени тропосферу и стратосферу, освещая при этом мезосферу, где на высоте в среднем ~ 83 км можно наблюдать МСО.

Начиная с 70-х гг. прошлого века МСО наблюдались визуально членами экипажей обитаемых космических аппаратов. МСО при наблюдении из космоса находятся обычно не выше $\approx 2^\circ$ над горизонтом. По мере приближения к ним, МСО оказываются на фоне освещенных Солнцем нижних слоев атмосферы и поверхности Земли, что приводит к невозможности их регистрации. В 2007 г. для исследования МСО был запущен спутник AIM (Aeronomy of Ice in the Mesosphere). Космический аппарат AIM позволил продемонстрировать возможность картирования полей МСО и измерения их альбедо [Russell et al., 2009].

В атмосферу Земли из космоса непрерывно влетает множество твердых тел — микрометеороидов (25–1000 мкм) и метеороидов (от 1000 мкм до нескольких метров и более). Большинство из падающих на Землю метеороидов — каменные, остальные — железные и железокосменные. Имеющиеся на сегодня оценки полного потока вещества, приходящего в атмосферу Земли из космоса, лежат в диапазоне 2–150 кт/год. Таким образом, в мезосферу и нижнюю термосферу инжектируется метеорное вещество в виде: атомов/молекул (метеорного пара), капель, сдуваемой с поверхности метеороида расплавленной пленки и более крупных кусков метеороида, образовавшихся в результате его дробления из-за возникающих в его объеме термонапряжений [Бронштэн, 1981]. Очевидно, что на высотах верхней мезосферы — нижней термосферы накапливается лишь самая легкая фракция продуктов абляции метеоров в виде слоев атомов металлов (Fe, Mg, Na, Ca, K) и других сопутствующих элементов (Si и др.). Осталь-

ные выводятся в результате гравитационного осаждения. Выше 100 км атомы присутствуют в виде ионов, а ниже — в виде слоев нейтральных атомов. Слои атомов металлов регистрировались фотометрами с поверхности Земли на высотах мезосферы и нижней термосферы, начиная с 50-х годов прошлого века, благодаря их экстремально большому сечению резонансного рассеяния. В настоящее время слои атомов металлов, метеорного происхождения, наблюдаются с помощью лидаров в диапазоне высот 80–105 км [Kane and Gardner, 1993]. Как правило, максимум светимости слоя атомов железа располагается на высоте 85–87 км, что на 5–7 км ниже соответствующих максимумов светимости слоев Na и K [Plane et al., 2015]. Аэрозольная фракция инжектированного в атмосферу метеорного вещества регистрируется с поверхности земли фотометрами при восходе и заходе Солнца [Mane and Mane, 2021]. Кроме того, по результатам наблюдений заходов и восходов Солнца прибором SOFIE (Solar Occultation For Ice Experiment), установленном на спутнике AIM, был также сделан вывод о присутствии в средней атмосфере в диапазоне высот 35–85 км аэрозольных частиц метеорного происхождения [Hervig et al., 2009]. При этом было отмечено, что летом объемная концентрация этих частиц в указанном высотном интервале минимальна.

В ходе космического эксперимента (КЭ) “Терминатор” неоднократно регистрировались слоистые атмосферные структуры (САС), располагающиеся в диапазоне высот 80–100 км. Данная статья является первой из двух планируемых, посвященных регистрации САС с российского сегмента (РС) Международной космической станции (МКС) в рамках КЭ “Терминатор”. Краткое описание используемой в КЭ научной аппаратуры (НА) приведено во втором разделе данной статьи. В третьем разделе на примере одного изображения САС демонстрируется технология обработки подобного рода снимков, которых к настоящему времени накопилось в созданной нами базе данных достаточно много. В заключительном разделе рассматриваются варианты интерпретации полученного изображения САС и формулируются основные выводы.

2. НАУЧНАЯ АППАРАТУРА КЭ “ТЕРМИНАТОР”

Научная аппаратура (НА) КЭ “Терминатор” состоит из двух комплектов: “Терминатор-Надир” и “Терминатор-Лимб”, предназначенных для фоторегистрации САС соответственно в двух случаях: направление визирования в надир и на лимб Земли. Каждый из комплектов НА состоит из: четырех фотокамер с объективами и светофильтрами; блока электроники, осуществляющего передачу изображений от фотокамер в бортовую ЭВМ;



Рис. 1. Комплект НА “Терминатор-Лимб”.

соединительных кабелей и поворотного кронштейна, для крепления блока фотокамер на иллюминаторе. В фотокамерах комплекта “Лимб” используются светофильтры с шириной спектрального диапазона пропускания 10 нм по уровню 0.5, центрированные на длины волн: 450, 540, 700 и 830 нм, и объективы с полем зрения $38.47^\circ \times 29.35^\circ$. Во всех фотокамерах используется ПЗС матрица ICX285, производимая компанией SONY.

Основные характеристики фотокамер приведены в табл. 1. Внешний вид комплекта НА “Терминатор-Лимб” приведен на рис. 1.

3. ОБРАБОТКА ИЗОБРАЖЕНИЯ САС

На рисунке 2 представлены три снимка лимба Земли, полученные при проведении на РС МКС КЭ “Терминатор”, в видимом и ближнем инфра-

Таблица 1. Характеристики фотокамер

Наименование	Значение
Тип ПЗС матрицы	SONY ICX285AL
Формат кадра, пиксель	1392 × 1032
Размер пикселя, мкм	6.45 × 6.45
Время накопления (экспозиции), мин	до 4.5
Максимальная частота съемки, Гц	7.5
Разрядность аналого-цифрового преобразования, бит	12
Динамический диапазон, Дб	61 (без биннинга)
Режим съемки	Периодический, внешний запуск, программный запуск, ведомый режим
Режимы объединения пикселей (биннинг)	2 × 2, 3 × 3, 4 × 4
Потребляемая мощность, Вт	2.0 (рабочий режим) 0.005 (“спящий” режим)

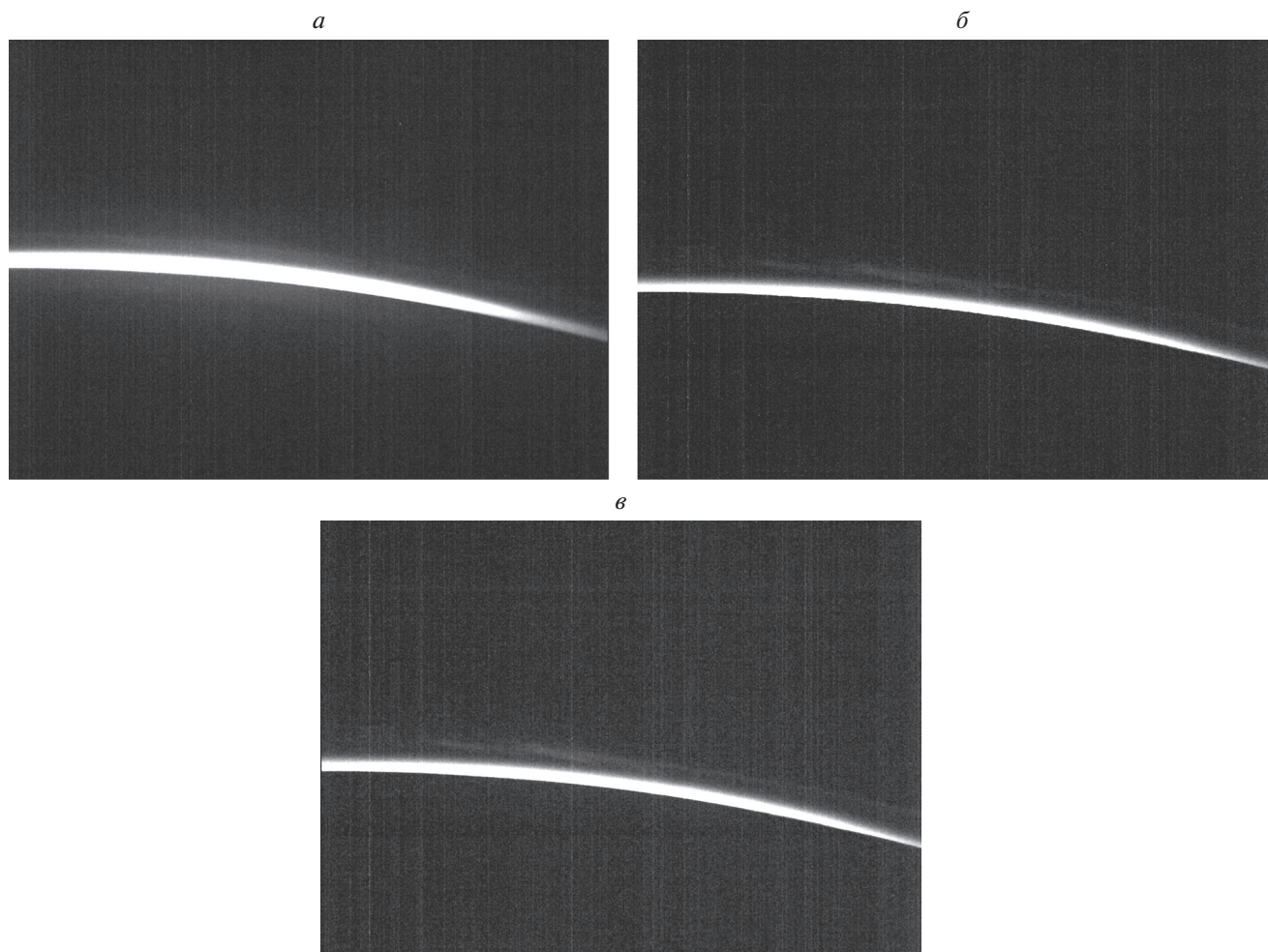


Рис. 2. Снимки (1392×1032 пикселя) атмосферного лимба Земли, полученные с МКС 7 февраля 2022 г. в 13:11:17 UTC. (а) — фотокамерой с фильтром 540 ± 5 нм; (б) — фотокамерой с фильтром 700 ± 5 нм; (в) — фотокамерой с фильтром 830 ± 5 нм. Данные от видеокамеры с фильтром 450 ± 5 нм не были получены.

красном (ИК) диапазонах длин волн (540 ± 5 нм, 700 ± 5 нм и 830 ± 5 нм). Снимки были сделаны 7 февраля 2022 г. в 13:11:17 UTC с экспозицией 1 с в момент, когда географическая широта (φ) и долгота (λ) подспутниковой точки МКС равнялись $\varphi = 37.52^\circ$ S и $\lambda = 140.68^\circ$ E, соответственно. Радиус-вектор МКС $\mathbf{r}$ в системе координат (СК) J2000 имел следующие компоненты $\mathbf{r} = (-2354.515; 4858.145; -4138.186)$ км. Соответственно, расстояние от станции до центра Земли (начала координат СК J2000) было равно $r = |\mathbf{r}| \approx 6802$ км. Направление на центр Солнца определялось направлением единичного вектора $\mathbf{s} = (0.7482; -0.6087; -0.2638)$, а на центр Луны — единичным вектором $\mathbf{m} = (0.8152; 0.5391; 0.2116)$. Азимут оптических осей видеокамер $\alpha = -143.79^\circ$. Исходя из этих данных, для наблюдателя, находящегося на МКС, были рассчитаны зенитные углы Солнца $\phi_s = 122.22^\circ$ и Луны $\phi_m = 91.48^\circ$, а также азимуты направлений на Солнце $\alpha_s = -151.17^\circ$ и Луну $\alpha_m = -75.71^\circ$ (см. ПРИЛОЖЕНИЕ).

Взаимное положение МКС, Земли, Солнца и видимой в сумеречном сегменте ночного неба свода светящейся области (лимб Земли) схематически показано на рис. 3. Лимб Земли представляет собой видимую с МКС область атмосферы, рассеивающую прямой солнечный свет. Высоту нижней границы этой области (т. В) оценим (не учитывая рефракцию) следующим простым выражением: $h_B \approx R/\cos[(\phi_s - 90^\circ - \arccos(R/r))/2] - R = 33$ км, в котором $R = 6370$ км — средний радиус Земли; ϕ_s — зенитный угол Солнца; $r = 6802$ км — расстояние от центра Земли (начало отсчета СК J2000) до МКС. Таким образом, видимый на снимках лимб Земли обусловлен молекулярным рэлеевским рассеянием солнечного света в средней и верхней стратосфере. При этом яркость лимба убывает с ростом высоты, в силу падения с высотой плотности атмосферы. По этой же причине яркость лимба падает в горизонтальном направлении по мере отклонения от солнечного азимута (см. рис. 4).

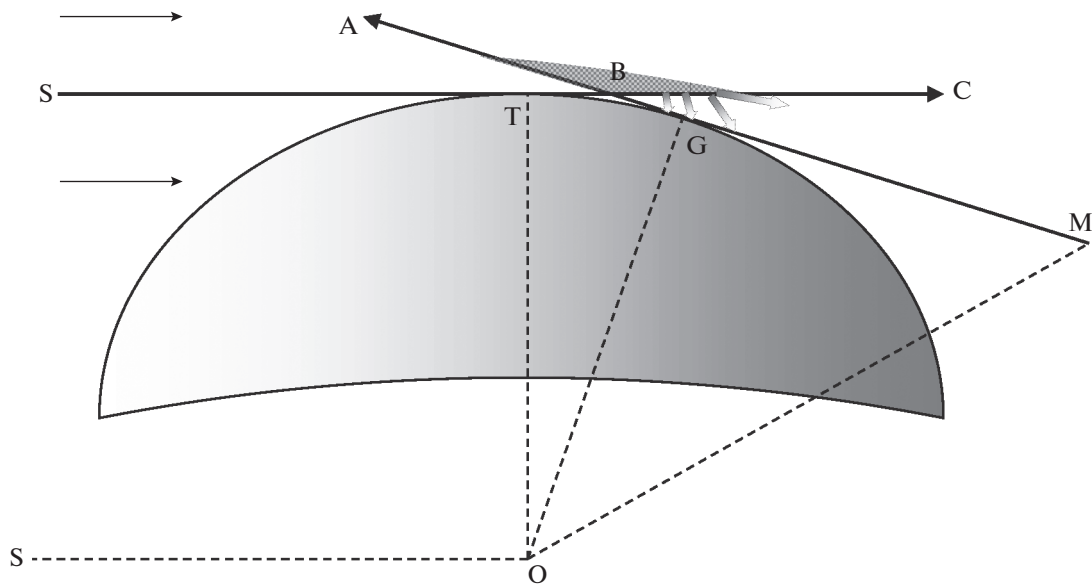


Рис. 3. Схема взаимного расположения МКС, Земли, Солнца и рассеивающей атмосферной области, видимой с МКС. т. О — центр земной сферы; SC — солнечный луч, касающийся земной сферы в т. Т; OG — радиус земной сферы, проведенный в точку касания G земной сферы и луча зрения МА наблюдателя, находящегося на МКС в т. М. Заштрихованная область внутри угла, образованного лучом зрения МА и солнечным лучом SC, представляет собой область рассеяния солнечного света, формирующая лимб Земли, видимая с МКС. Стрелками обозначен рассеянный этой областью солнечный свет, подсвечивающий как поверхность Земли, так и атмосферные области, находящиеся в ее тени.

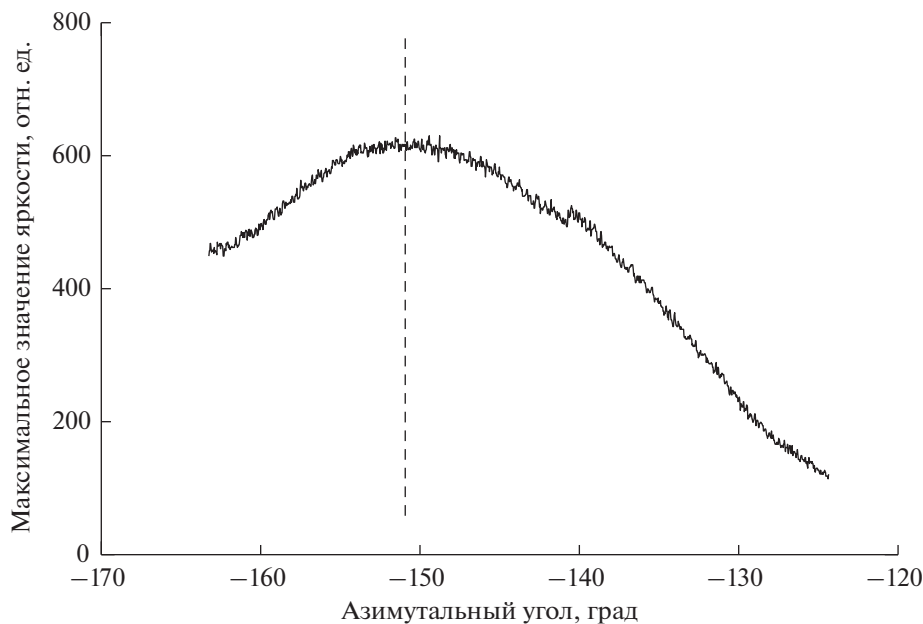


Рис. 4. Азимутальная зависимость максимального значения интенсивности рассеянного солнечного излучения, зарегистрированного камерой с фильтром 700 ± 5 нм. Вертикальная штриховая линия — азимут на Солнце.

На всех снимках на рис. 2, можно также различить некоторую САС, располагающуюся выше лимба Земли и заметно уступающую ему в яркости. Наиболее четко эта САС проявляется на снимке, сделанном камерой с фильтром 700 ± 6 нм (рис. 2б). Рассмотрим его более внимательно. Видно, что лимб Земли и расположенная над ним

САС, имеют неоднородную пространственную структуру, иллюстрацией чего могут послужить четыре фотометрических профиля, представленные на рис. 5. Стрелкой на них указано положение видимой на снимках слабо светящейся САС. Отметим, что для азимута $\alpha = -132.2^\circ$ САС практически неотличима от фона. Однако, чем ближе

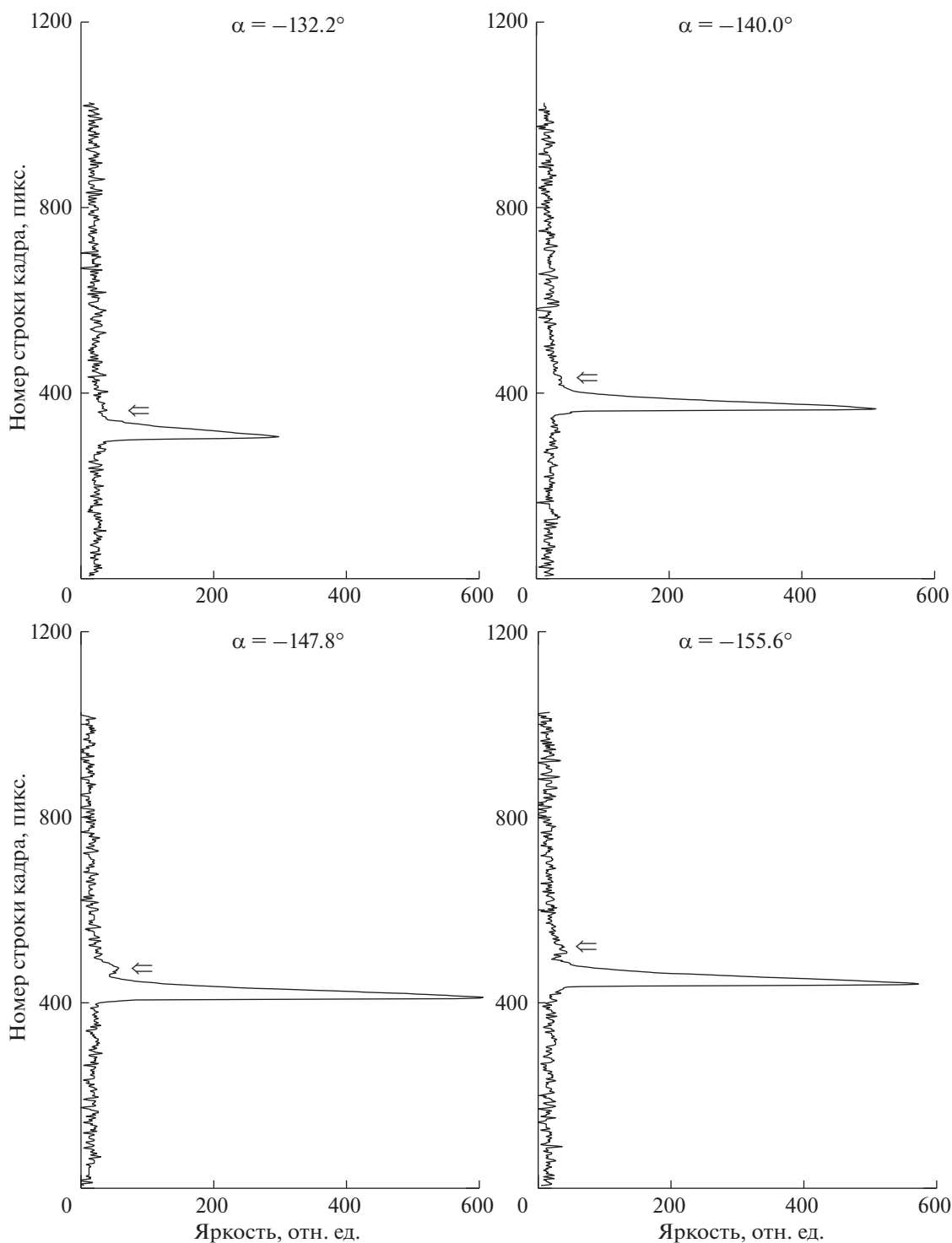


Рис. 5. Фотометрические профили сечений снимка, представленного на рис. 2б.

азимутальное направление наблюдения к азимуту на Солнце ($\alpha_s = -151.18^\circ$), тем явственнее проявляется САС.

Область главного максимума фотометрических профилей, представленных на рис. 5, можно разделить на две подобласти: роста и спада ее яр-

кости по мере увеличения номера строки кадра. Область спада яркости относится к лимбу Земли, т.е. к области атмосферы, рассеивающей световой поток, проходящий непосредственно от Солнца. Область роста — к освещенной поверхности Земли или тропосферной облачности, освещенность которых солнечным светом, рассеянным в лимбе

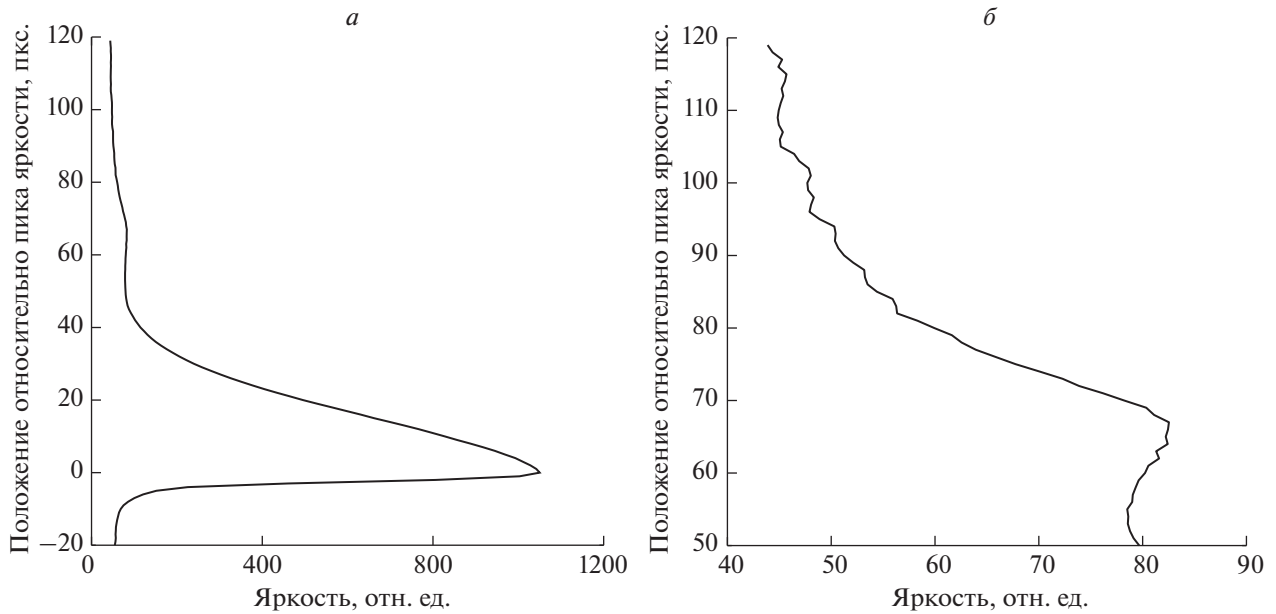


Рис. 6. Осредненный фотометрический профиль в окрестности лимба Земли. За реперный пиксель при осреднении принимался пиксель, соответствующий максимуму свечения в каждом сечении. Стрелка указывает на положение САС. (а) — полный осредненный фотометрический профиль; (б) — верхняя часть полного осредненного фотометрического профиля.

Земли, растет по мере приближения к линии земного горизонта (см. рис. 3). Соответственно, максимум яркости на рассматриваемых сечениях и есть видимый земной горизонт. Таким образом, область фотометрического сечения, расположенная ниже максимума, представляет собой изображение земной поверхности, а все что выше — относится к атмосфере.

Имея это в виду, вычислим высоту наблюдаемой САС. Для чего проведем осреднение фотометрических профилей в окрестности лимба Земли в азимутальном интервале от -155° до -132° (см. рис. 4), рассматривая при этом в качестве репера (пикселя с нулевым номером) в каждом азимутальном сечении — пиксель с максимальным значением яркости, соответствующий направлению на видимый горизонт Земли. Результат осреднения представлен на рис. 6. Как видно из этого рисунка, середина САС смещена относительно земного лимба на $\approx 66 \pm 3$ пикселя. Так как фокусное расстояние объектива $F = 2002$ пикселя ($=12.5$ мм), то оценка углового расстояния γ между земным горизонтом и серединой САС дает величину $\gamma = 1.81^\circ \pm 0.08^\circ$.

Как следует из рис. 7, формула для вычисления высоты САС имеет следующий вид:

$$h = r \sin \left(\arcsin \left(\frac{R}{r} \right) + \delta + \gamma \right) - R, \quad (1)$$

где R — радиус Земли; r — расстояние от МКС до центра Земли (начала отсчета СК J2000); $\delta \approx 0.6^\circ$ — угол рефракции для наблюдателя на поверхности

Земли при заходе/восходе Солнца. Значения h , вычисленные по формуле (1) при фиксированном значении $r = 6802$ км, изменяются лишь на два километра при переходе от величины радиуса Земли $R \approx 6378$ км (на экваторе референц-эллипсоида Красовского), к $R \approx 6357$ км (на полюсах референц-эллипсоида Красовского). В силу небольшой разницы между $h_{\min}$ и $h_{\max}$, не будет большой ошибкой аппроксимировать поверхность Земли сферой радиуса $\bar{R} = 6370$ км. В результате получим $h \approx 99$ км, и ошибка в определении h будет в основном определяться ошибкой в определении величины углового расстояния γ между серединой САС и видимым земным горизонтом, т.е. $h \approx 99 \pm 3$ км.

С использованием формул, приведенных в ПРИЛОЖЕНИИ, были рассчитаны географические координаты видимого с МКС земного горизонта и видимой части САС. Как видно из рис. 8, наблюдаемый сектор САС протянулся, приблизительно, на 8° (от 47° S до 55° S) с севера на юг, и, примерно, на 13° с запада на восток (от 119° E до 132° E).

Кроме того, расчеты показывают (см. рис. 9), что зенитный угол линии горизонта Земли для наблюдаемого с МКС сектора САС, составляет $\approx 99^\circ$, а минимальная величина зенитного угла Солнца $\approx 103.6^\circ$. Из этого следует, что наблюдаемый участок САС не освещен прямым солнечным светом и находится в тени Земли. Тем не менее, рис. 10 демонстрирует явную азимутальную

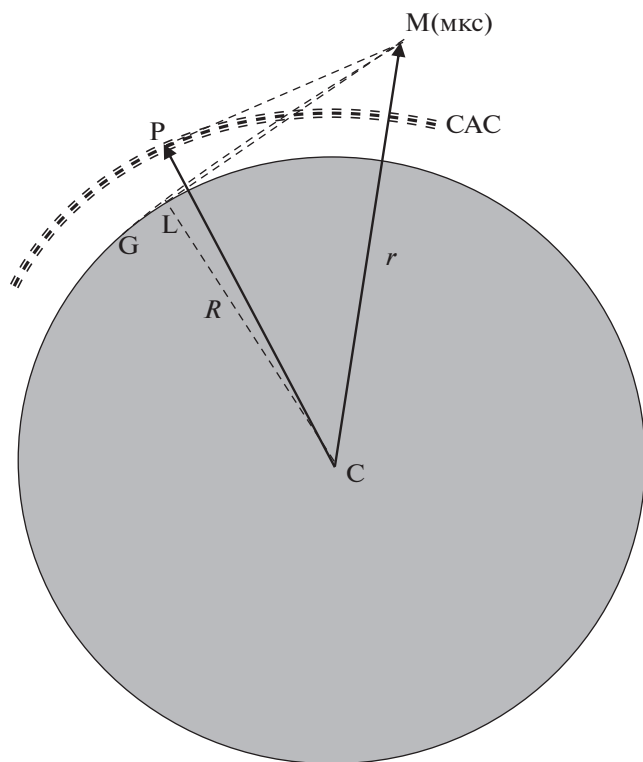


Рис. 7. Схема регистрации САС с МКС. МР — луч зрения касательный САС; G — точка видимого с МКС горизонта; L — точка геометрического горизонта; $\angle PMG = \gamma$ — угол между видимым с МКС горизонтом и серединой САС; $\angle GML = \delta$ — угол рефракции; $\angle LMC = \arcsin(R/r)$.

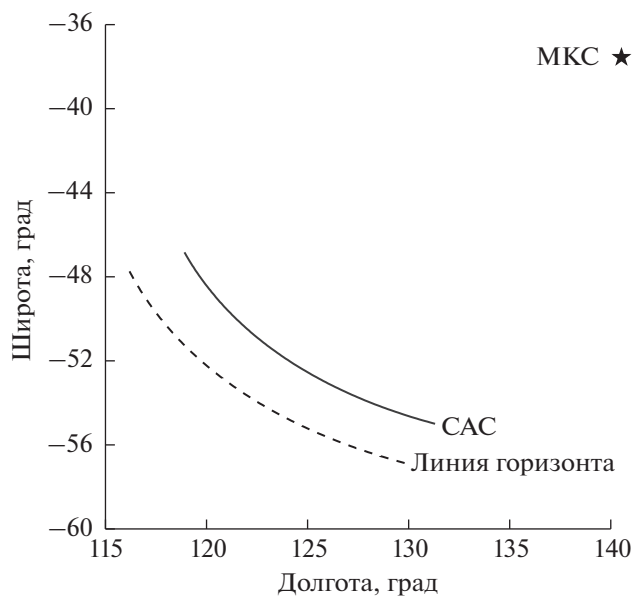


Рис. 8. Рассчитанное географическое положение линии горизонта (прерывистая линия) и видимой части САС (непрерывная линия) на рис. 2б. Положение МКС отмечено звездочкой.

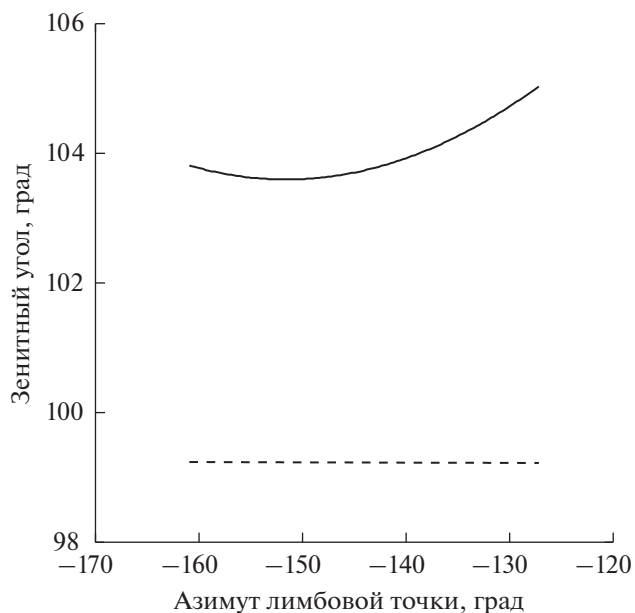


Рис. 9. Зенитный угол Солнца для лимбовых точек САС (непрерывная линия) и зенитный угол линии горизонта для этих же точек (штриховая линия). Минимум зенитного угла Солнца $\approx 103.6^\circ$ соответствует азимуту на Солнце (-151.17°) . Зенитный угол горизонта Земли, для всех точек лимба САС $\approx 99.2^\circ$.

зависимость яркости САС, с максимумом, смещенным всего на $\approx 5^\circ$ относительно направления на Солнце. Последнее обстоятельство свидетельствует в пользу того, что подсветка наблюдаемой САС осуществляется благодаря рэлеевскому рассеянию солнечного света на стратосферных высотах в непосредственной близости от солнечного терминатора, т.е. подсветка зарегистрированной САС исходит от лимба Земли. Из-за малой яркости такого источника света, для того чтобы аэрозольный слой был виден на полученных снимках, нам понадобилось увеличить контрастность изображения за счет растяжения исходной (очень узкой) гистограммы распределения яркости пикселей на весь динамический диапазон видеокамер.

4. АНАЛИЗ И ВЫВОДЫ

В ходе наблюдательного сеанса, проведенного 7 февраля 2022 г., было получено порядка 270 изображений данной САС в трех диапазонах длин волн солнечного спектра. Географическая привязка этих изображений, приведена на рис. 11. Отметим, что в данном наблюдательном сеансе регистрирующая аппаратура включалась на нисходящем витке в момент пересечения орбитальной станцией 35° южной широты. После этого съемка лимба Земли шла в автоматическом режиме с интервалом 10 с. Съемка прекращалась, ко-

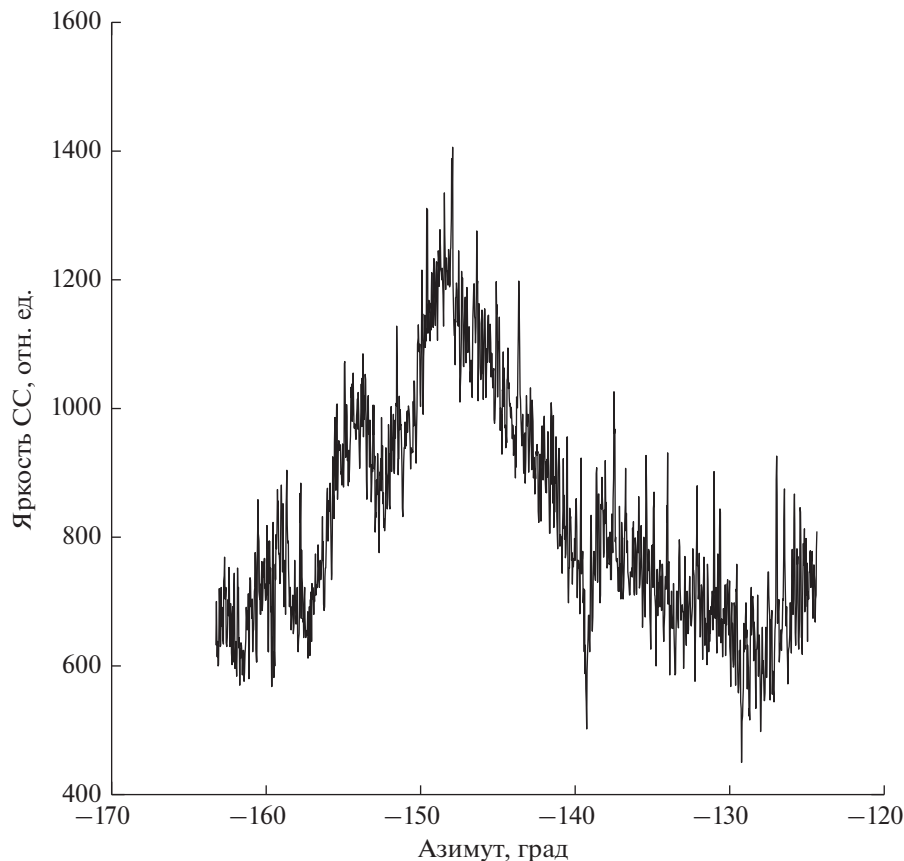


Рис. 10. Зависимость светимости САС от азимута. Здесь, в соответствии с рис. 6б, под светимостью САС понимается сумма значений 30 последовательных пикселей, расположенных в интервале 55–85 пикселей выше максимума лимба Земли.

гда орбитальная станция пересекала широту 35° S в обратном направлении, т.е. на восходящем витке. Анализ полученных фотографий показал, что изображение САС присутствует на всех фотографиях сразу после начала автоматической съемки до того момента, когда различить САС на фоне все более яркого лимба Земли становится невозможно. Имея это в виду, можно предположить, что данная САС имеет протяженность планетарного масштаба, по крайней мере, в широтной полосе 47° – 55° Южного полушария (см. рис. 11).

Как уже упоминалось во введении, в мезосфере и нижнюю термосферу постоянно инжектируется метеорное вещество в виде атомов/молекул (метеорного пара). В результате конденсации/полимеризации этих молекул и атомов в атмосфере возникают мельчайшие аэрозольные частицы нанометрового размера [Plane et al., 2015], играющие важную роль в гетерогенной химии на мезосферных высотах и в таких атмосферных явлениях как: серебристые облака, полярное летнее мезосферное эхо [Cho and Röttger, 1997; Blix, 2003]. Частицы таких размеров, действительно, были обнаружены в ракетных экспериментах на

высотах верхней мезосферы — нижней термосферы [Rapp et al., 2007]. Модельные оценки показали, что интенсивность абляции метеороидов чрезвычайно чувствительна к форме их поверхности. В силу этого скорость испарения метеорного вещества быстро снижается с ростом отношения площади поверхности метеороида к его объему. Соответственно смещается по высоте и кривая интенсивности образования частиц нанометрового размера. Так, если для сферических метеороидов, радиусом 100 мкм, максимум этой кривой приходится на высоту ≈ 85 км, то в случае метеорных частиц той же массы, форма которых характеризуется фрактальной размерностью D , лежащей в интервале $1.7 \leq D \leq 2.1$, наиболее интенсивное испарение метеорного вещества происходит на высоте 103 км [Kalashnikova et al., 2000].

Выше сказанное позволяет предположить, что свечение наблюдаемой САС обусловлено рассеянием солнечного света на некоторой аэрозольной слоистой структуре метеорного происхождения, состоящей из частиц, размер которых составляет несколько нанометров.

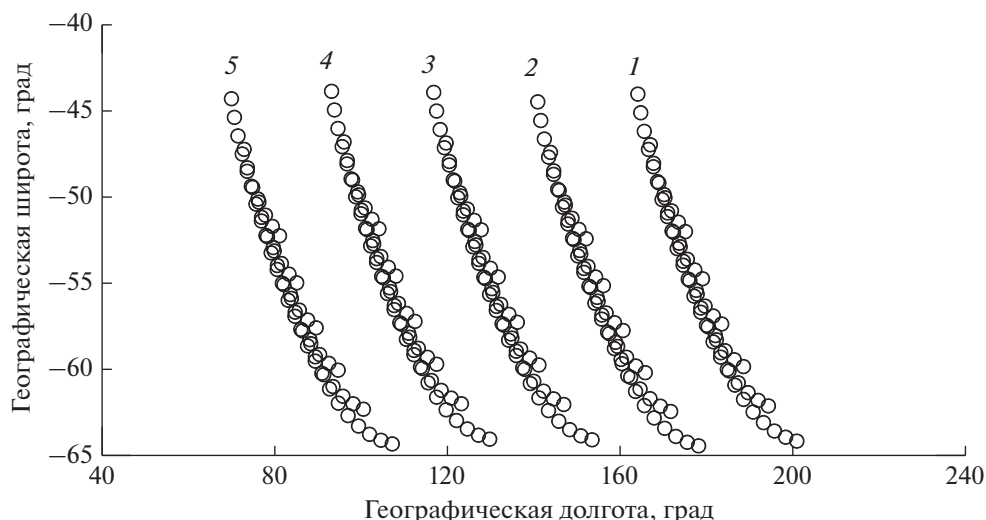


Рис. 11. Географическая привязка изображений САС, полученных в наблюдательном сеансе 07.02.2022 г. Время съемки: виток 1 – 10:04:37 UTC – 10:09:37 UTC; виток 2 – 11:37:37 UTC – 11:42:37 UTC; виток 3 – 13:10:17 UTC – 13:15:17 UTC; виток 4 – 14:43:07 UTC – 14:48:07 UTC; виток 5 – 16:16:07 UTC – 16:21:07 UTC.

В качестве альтернативы данному допущению можно рассмотреть следующие варианты происхождения наблюдаемой САС.

1. Зарегистрированная САС представляет собой МСО. Учитывая географическое положение и время регистрации данной САС (лето в Южном полушарии), можно было бы считать данные снимки лимбовыми изображениями МСО. Однако, ее пространственные параметры (высота и толщина слоя), явно превышают значения соответствующих параметров, допустимых для МСО.

2. Свечение наблюдаемой САС обусловлено собственным излучением атмосферы. Присутствие среди атмосферных эмиссий системы гидроксильных полос Мейнела и наличие в спектре излучения ночной верхней атмосферы участков с непрерывным спектром (континуум) могло бы объяснить (по крайней мере, частично) факт одновременной регистрации наблюдаемой САС в видимом и ближнем ИК-диапазоне спектра. Однако, очевидная азимутальная зависимость интенсивности свечения наблюдаемой САС (см. рис. 10) исключает возможность рассмотрения собственного излучения атмосферы в качестве основного компонента спектра ее излучения.

Отдельно следует остановиться на эксперименте по исследованию вертикальной структуры свечения ночного неба, проведенном в январе 1999 г. на орбитальной станции (ОС) “Мир” [Гурвич и др., 2002]. Условия его проведения были близки к соответствующим условиям наблюдения САС в КЭ “Терминатор”. Действительно, в рамках эксперимента на ОС “Мир” проводилось фотометрическое сканирование ночной верхней атмосферы в направлении лимба Земли в спек-

тральном диапазоне 420–530 нм. Вертикальная плоскость сканирования была перпендикулярна плоскости солнечного терминатора. В обоих экспериментах зондируемые области атмосферы (т.е. области атмосферы в окрестности перигея луча зрения фотоаппарата или оптической оси фотометра) не были освещены прямыми лучами Солнца. Форма полученных в этих экспериментах высотных зависимостей яркости свечения атмосферы весьма близки друг к другу, но в КЭ “Терминатор” максимум яркости располагался в окрестности высоты 99 км, а в эксперименте на ОС “Мир” средняя высота максимума составляла 86 км [Гурвич и др., 2002]. При этом свечение атмосферы, зарегистрированное в эксперименте на ОС “Мир”, было интерпретировано на основе наземных измерений [Krassovsky et al., 1962; Фишкова, 1983] как собственное излучение атмосферы, принадлежащее ее континууму.

На наш взгляд, близость условий проведения экспериментов и отсутствие в эксперименте на ОС “Мир” измерений азимутальной зависимости яркости ночного неба позволяет трактовать зарегистрированное в этом эксперименте излучение как дважды рассеянное (в лимбе Земли и в аэрозольном слое метеорного происхождения) излучение Солнца, т.е. так, как мы интерпретируем результаты КЭ “Терминатор”. В этом случае разность в положениях максимумов высотных профилей яркости атмосферы, по крайней мере, качественно, можно объяснить глобальной меридиональной циркуляцией атмосферы, предполагающей подъем и адиабатическое охлаждение воздуха в летнем полушарии и соответствующее нисходящее движение воздуха в зимнем полушарии. Проведенные модельные расчеты [Megner

et al., 2006], показали, что в этом случае аэрозольные слои метеорного происхождения сдвигаются вверх в летнем полушарии, и вниз в зимнем.

ПРИЛОЖЕНИЕ

В данном разделе представлены формулы и определения основных понятий, использованных нами для проведения расчетов в ходе подготовки данной статьи. Все вектора, используемые в данной статье, определены в инерциальной системе координат (СК) J2000. Эта СК относится к эпохе J2000, соответствующей юлианской дате 2451545.0 или 11 ч 58 мин 55.816 с 1 января 2000 г. времени UTC. Плоскость XY СК J2000 совпадает с плоскостью экватора эпохи J2000. Ось X направлена в точку весеннего равноденствия (пересечения экватора и эклиптики). Ось Z ортогональна плоскости XY и проходит через Северный полюс Земли. Ось Y дополняет СК J2000 до правой тройки.

Зенитный угол ϕ объекта, направление на который из точки околоземного пространства $\mathbf{r} = (r_1, r_2, r_3)$ задано единичным вектором $\mathbf{n} = (n_1, n_2, n_3)$,

$$\phi = \arccos\left(\frac{\mathbf{r} \times \mathbf{n}}{r}\right), \text{ где } r = \sqrt{r_1^2 + r_2^2 + r_3^2}. \quad (\text{П1})$$

Географическая широта (ϕ) точки околоземного пространства $\mathbf{r} = (r_1, r_2, r_3)$

$$\phi = \left[\frac{\pi}{2} - \arccos\left(\frac{\mathbf{\Omega} \times \mathbf{r}}{r}\right) \right] \frac{180^\circ}{\pi}, \quad (\text{П2})$$

где $\mathbf{\Omega} = (0, 0, 1)$ – единичный вектор, параллельный оси вращения Земли и направленный в сторону Северного полюса.

Разность долгот $\Delta\lambda = \lambda_p - \lambda_r$ между долготой λ_p точки околоземного пространства $\mathbf{p} = (p_1, p_2, p_3)$ и долготой λ_r точки околоземного пространства $\mathbf{r} = (r_1, r_2, r_3)$

$$\Delta\lambda = \frac{((\mathbf{\Omega} \times \mathbf{r}) \times (\mathbf{\Omega} \times \mathbf{p})) \cdot \mathbf{\Omega}}{|((\mathbf{\Omega} \times \mathbf{r}) \times (\mathbf{\Omega} \times \mathbf{p})) \cdot \mathbf{\Omega}|} \times \arccos\left(\frac{(\mathbf{\Omega} \times \mathbf{r}) \cdot (\mathbf{\Omega} \times \mathbf{p})}{|\mathbf{\Omega} \times \mathbf{r}| |\mathbf{\Omega} \times \mathbf{p}|}\right) \frac{180^\circ}{\pi}. \quad (\text{П3})$$

Воспользовавшись свойством тройного векторного произведения, преобразуем (П3) к следующему виду:

$$\Delta\lambda = \frac{r_1 p_2 - r_2 p_1}{|r_1 p_2 - r_2 p_1|} \arccos\left(\frac{r_1 p_1 + r_2 p_2}{\sqrt{r_1^2 + r_2^2} \sqrt{p_1^2 + p_2^2}}\right) \frac{180^\circ}{\pi}.$$

Единичный вектор нулевого азимута $\mathbf{n}_0$ для точки околоземного пространства $\mathbf{r} = (r_1, r_2, r_3)$ лежит в плоскости, образованной векторами $\mathbf{r}$ и $\mathbf{\Omega}$, перпендикулярен вектору $\mathbf{r}$ и удовлетворяет условию $\mathbf{n}_0 \times \mathbf{\Omega} \geq 0$.

$$\mathbf{n}_0 = \frac{\mathbf{r} \times (\mathbf{\Omega} \times \mathbf{r})}{|\mathbf{r} \times (\mathbf{\Omega} \times \mathbf{r})|} = \frac{r^2 \mathbf{\Omega} - (\mathbf{r} \times \mathbf{\Omega}) \mathbf{r}}{|\mathbf{r} \times (\mathbf{\Omega} \times \mathbf{r})|}. \quad (\text{П4})$$

Азимутальным вектором $\mathbf{n}_\alpha$ будем называть вектор, перпендикулярный радиус-вектору $\mathbf{r}$, составляющий угол α с вектором нулевого азимута. Азимутальный вектор $\mathbf{n}_\alpha$ есть результат поворота вектора нулевого азимута $\mathbf{n}_0$ на угол α по часовой (в случае $\alpha > 0$), или против часовой (в случае $\alpha < 0$) стрелки вокруг вектора $\mathbf{r}$. Математически эта операция определяется перемножением кватерниона поворота, на угол $-\alpha$ вокруг радиуса-вектора $\mathbf{r}$, $[\cos(-\alpha), \sin(-\alpha) \mathbf{r}/r]$ и чистого кватерниона $[0, \mathbf{n}_0]$,

$$\mathbf{n}_\alpha = \left[\cos(-\alpha), \frac{\sin(-\alpha)}{r} \mathbf{r} \right] [0, \mathbf{n}_0] = \left[\frac{\sin(\alpha)}{r} (\mathbf{r} \times \mathbf{n}_0), \cos(\alpha) \mathbf{n}_0 - \frac{\sin(\alpha)}{r} \mathbf{r} \times \mathbf{n}_0 \right].$$

Так как $\mathbf{r} \times \mathbf{n}_0 = 0$, то результатом поворота будет чистый кватернион, соответствующий азимутальному вектору

$$\mathbf{n}_\alpha = \cos(\alpha) \mathbf{n}_0 - \frac{\sin(\alpha)}{r} (\mathbf{r} \times \mathbf{n}_0). \quad (\text{П5})$$

Вектор солнечного азимута $\mathbf{n}_s$ лежит в плоскости, образованной векторами $\mathbf{r}$ и $\mathbf{s}$, перпендикулярен вектору $\mathbf{r}$ и удовлетворяет условию $\mathbf{n}_s \times \mathbf{s} \geq 0$, $\mathbf{s} = (s_1, s_2, s_3)$ – единичный вектор, направленный в центр Солнца.

$$\mathbf{n}_s = \mathbf{r} \times (\mathbf{s} \times \mathbf{r}) = r^2 \mathbf{s} - (\mathbf{r} \times \mathbf{s}) \mathbf{r}. \quad (\text{П6})$$

Азимут направления на Солнце α_s из точки околоземного пространства $\mathbf{r} = (r_1, r_2, r_3)$.

$$\alpha_s = \frac{\mathbf{r} \times (\mathbf{n}_s \times \mathbf{n}_0)}{|\mathbf{r} \times (\mathbf{n}_s \times \mathbf{n}_0)|} \arccos(\mathbf{n}_s \times \mathbf{n}_0) \frac{180^\circ}{\pi}. \quad (\text{П7})$$

Определение географических координат (широта ϕ и долгота λ) точки касания сферы, радиуса R с центром, совмещенным с центром Земли, лучом, проведенным из конца вектора $\mathbf{r} = (r_1, r_2, r_3)$ в азимутальном направлении α .

В соответствии с приведенной ниже схемой вектор $\mathbf{p}$, проходящий через точку касания луча зрения со сферой радиуса R , выражается через известные векторы $\mathbf{n}_\alpha$ и $\mathbf{r}$:

$$\mathbf{p} = \mathbf{r} + \mathbf{n}_\alpha r \sqrt{\frac{r^2}{R^2} - 1}. \quad (\text{П8})$$

Тогда широта точки касания вычисляется по формуле (П2). Долгота – по формуле (П3), при условии, что известна долгота вектора $\mathbf{r}$.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследования выполнены в рамках ДОЛГОСРОЧНОЙ ПРОГРАММЫ ЦЕЛЕВЫХ РАБОТ на МКС, проводимых Государственной корпорацией “РОСКОСМОС”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бронштэн В.А. Физика метеорных явлений. М.: Наука, 416 с. 1981.
- Гурвич А.С., Воробьёв В.В., Савченко С.А., Пахомов А.И., Падалка Г.И., Шефов Н.Н., Семёнов А.И. Ночное свечение верхней атмосферы в диапазоне 420–530 нм по измерениям на орбитальной станции “Мир” в 1999 г. // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 42. № 4. С. 541–546. 2002.
- Краснопольский В.А. Физика свечения атмосфер планет и комет. М.: Наука, 304 с. 1987.
- Никольский Г.М., Платов Ю.В., Бельмади М., Бутов В.В., Ванярха Е.С., Джанибеков В.А., Кретьен Ж.-Л., Кучми С. Свечение стратосферного слоя, наблюдавшееся на орбитальной станции “Салют-7” // Исследование Земли из космоса. № 6. С. 3–8. 1987.
- Платов Ю.В., Иванов–Холодный Г.С., Платова Г.М., О Гым Ден, Ванярха Е.С. Неоднородная структура эмиссионных слоев ионосферы по фотографическим наблюдениям с борта орбитальной станции “Салют-7” // Космич. исслед. Т. 27. С. 739–747. 1989.
- Семёнов А.И., Платов Ю.В. Собственное свечение верхней атмосферы Земли. Энциклопедия низкотемпературной плазмы. Тематический том 1–3: Ионосферная плазма. С. 164–175. 2008.
- Фишкова Л.М. Ночное излучение среднеширотной верхней атмосферы Земли. Тбилиси: Мецниереба, 272 с. 1983.
- Шефов Н.Н., Семёнов А.И., Хомич В.Ю. Излучение верхней атмосферы – индикатор ее структуры и динамики. М.: ГЕОС, 740 с. 2006.
- Blix T.A. Relations between small scale electron number density fluctuations, radar backscatter, and charged aerosol particles // J. Geophys. Res. V. 108(8). 8450. 2003. <https://doi.org/10.1029/2002.JD002430>
- Cho J.Y., Rottger J. An updated review of polar mesosphere summer echoes: Observation, theory, and their relationship to noctilucent clouds and subvisible aerosols // J. Geophys. Res. – Atmos. V. 102. № 2. P. 2001–2020. 1997. <https://doi.org/10.1029/96.JD02030>
- Hervig M.E., Gordley L.L., Deaver L.E., Siskind D.E., Stevens M.H., Russell III J.M., Bailey S.M., Megner L., Bardeen C.G. First satellite observations of meteoric smoke in the middle atmosphere // Geophys. Res. Lett. V. 36. L18805. 2009. <https://doi.org/10.1029/2009GL039737>
- Kalashnikova O., Horanui M., Thomas G.E., Toon O.B. Meteoric smoke production in the atmosphere // Geophys. Res. Lett. V. 27. P. 3293–3296. 2000.
- Kane T.J., Gardner C.S. Lidar observations of the meteoric deposition of mesospheric metals // Science. V. 259. P. 1297–1300. 1993.
- Koutchmy S., Nikolsky G.M. The night sky from Salyut 7 // Sky and telescope. V. 65(1). P. 23–25. 1983.
- Krassovsky V.I., Shefov N.N., Yarin V.I. Atlas of the airglow spectrum λ 3000–12400 Å // Planet. Space Sci. V. 9. № 12. P. 883–915. 1962.
- Mane P.B., Mane D.B. Study of aerosol vertical distribution during meteor showers of January 2009 // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 213. 105511. 2021.
- Megner L., Rapp V., Gumbel J. Distribution of meteoric smoke – sensitivity to microphysical properties and atmospheric conditions // Atmos. Chem. Phys. V. 6. P. 4415–4426. 2006.
- Plane J.M.C., Feng W., Dawkins E.C.M. The mesosphere and metals: Chemistry and changes // Chem. Rev. V. 115. P. 4497–4541. 2015. <https://doi.org/10.1021/cr500501m>
- Rapp M., Strelnikova I., Gumbel J. Meteoric smoke particles: Evidence from rocket and radar techniques // Adv. Space Res. V. 40. P. 809–817. 2007.
- Russell J.M., Bailey S.M., Gordley L.L., Rusch D.W., Horányi M., Hervig M.E., Thomas G.E., Randal C.E., Siskind D.E., Stevens M.H., Summers M.E., Taylor M.J., Englert C.R., Espy P.J., McClintock W.E., Merkel A.W. (1 March 2009). “The Aeronomy of Ice in the Mesosphere (AIM) mission: Overview and early science results” // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 71(3–4). P. 289–299. 2009.