

УДК 528.813:629.78

ЭМИССИОННЫЕ СЛОИ АТМОСФЕРЫ ПО ФОТОГРАФИЧЕСКИМ НАБЛЮДЕНИЯМ С БОРТА МКС

© 2019 г. Ю. В. Платов^{1, *}, С. Кучми^{2, **}, С. Ш. Николайшвили^{3, ***}

¹Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН), г. Москва, г. Троицк, Россия

²Парижский астрофизический институт, CNRS и университет Сорбонна, Париж, Франция

³Институт прикладной геофизики им. акад. Е.К. Федорова Росгидромета (ИПГ), г. Москва, Россия

*e-mail: yplaton@mail.ru

**e-mail: koutchmy@iap.fr

***e-mail: ser58ge@mail.ru

Поступила в редакцию 27.08.2018 г.

После доработки 11.10.2018 г.

Принята к публикации 24.01.2019 г.

Материалы фотографических и видео наблюдений, полученные астронавтом Тома Песке (Thomas Pesquet – Европейское космическое агентство) во время 51-й экспедиции на МКС, содержат ряд цветных изображений эмиссионных и рассеивающих слоев земной атмосферы в ночных и сумеречных условиях. На снимках над лимбом Земли отчетливо видны звезды различных созвездий, что дает возможность производить точное определение геометрических параметров эмиссионных слоев и условий их освещенности Солнцем. Предложена модель, объясняющая голубое свечение тонкого слоя атмосферы вблизи горизонта в результате рэлеевского рассеяния солнечного света в нижних слоях атмосферы.

DOI: 10.1134/S0016794019030118

1. ВВЕДЕНИЕ

Понятие “эмиссионные слои” прочно вошло в терминологию физики верхней атмосферы в семидесятых годах прошлого века после визуальных наблюдений с пилотируемых космических аппаратов различных светящихся слоев над ночным горизонтом Земли. Первоначально наблюдатели описывали этот эффект как 2–3 тонких (1° – 2°) слабо светящихся слоя, расположенных на высотах до 8° над ночным горизонтом. В ряде случаев отмечалась цветная вертикальная структура областей свечения [Лазарев и др., 1981]. Инструментальная регистрация этих объектов представляла в то время определенные трудности, связанные с их низкой яркостью и, как следствие, необходимостью гидирования объектов съемки при длительных экспозициях. Первые качественные фотографии этих слоев были получены на станции “Салют 7” в начале 1980-х гг., в частности, в 1982 г., во время советско-французского эксперимента “ПСН” (PCN, от французского Photographier le Ciel Nocturne – фотографирование ночного неба) [Koutchmy and Nikolsky, 1983; Никольский и др., 1987; Платов и др., 1989].

Сравнение данных, полученных на космических аппаратах, с результатами наземных наблюдений свечения ночного неба позволило отождествить наблюдаемые из космоса светящиеся слои с областями характерных атмосферных эмиссий [Шефов и др., 2006; Семенов и Платов, 2008].

Впоследствии регулярные наблюдения атмосферных эмиссий с космических аппаратов, к сожалению, не проводились, хотя эпизодически инструментально регистрировались различные оптические явления в атмосфере. В частности, во время работы 51-й экспедиции на МКС (20 ноября 2016 г. – 10 апреля 2017 г.) французский астронавт Тома Песке получил ряд замечательных фотографий эмиссионных слоев атмосферы Земли.

Современные средства регистрации – цифровые фотоаппараты и видеокамеры – имеют высокую чувствительность, превышающую чувствительность и динамический диапазон пленочной аппаратуры, что позволяет регистрировать слабо светящиеся объекты с достаточно короткими экспозициями.

Цель настоящей статьи состоит в определении геометрических параметров эмиссионных слоев

атмосферы, зарегистрированных с борта МКС в 2017 г., и определении физического механизма свечения узкого синего слоя вблизи видимого горизонта.

2. ИДЕНТИФИКАЦИЯ ХАРАКТЕРНЫХ ЭМИССИЙ

Первоначально визуально из космоса наблюдались два светящихся слоя на высотах ~110 км (зеленый) и ~250 км (красный), которые получили названия “первый” и “второй” эмиссионный слой. На самом деле структура областей атмосферной эмиссии значительно сложнее из-за суперпозиции нескольких слоев в мезопаузе-нижней термосфере.

В настоящее время можно надежно идентифицировать несколько слоев атмосферы.

Эмиссии металлов. Металлы в верхней атмосфере присутствуют в виде малых примесей. Их наличие определяется испарением метеорного вещества или, как в случае натрия, диффузионными процессами в атмосфере. Данные ракетных и лидарных измерений свидетельствуют о том, что эмиссии металлов генерируются в слое толщиной ~10 км с максимальной яркостью на высоте ~90 км. Доминирующим механизмом излучения является резонансное рассеяние солнечного света, поэтому этот слой имеет достаточно высокую яркость только в условиях освещенности Солнцем. Излучение дублета натрия 589.0–589.6 нм имеет интенсивность ~1000 рэлей. Здесь и далее интенсивность приведена для условий наблюдения с Земли “поперек слоя”, при наблюдениях с космических аппаратов “вдоль слоя” интенсивность свечения возрастает в ~50 раз. Эмиссии калия 769.9 нм и магния 280.0 нм также довольно интенсивны, ~400 и ~300 рэлей, но не воспринимаются визуально. В ночное время интенсивность этих эмиссий не превышает десятков рэлей.

Атомарный кислород. Излучение атомарного кислорода с длиной волны 557.7 нм было первой атмосферной эмиссией, обнаруженной в условиях средних широт. Эта линия соответствует переходу между метастабильными уровнями 1S и 1D нейтрального атома кислорода. Время жизни атома кислорода в состоянии 1S ~ 0.8 с. В слоях атмосферы ниже 90 км эта линия очень слаба, так как максимум концентрации атомарного кислорода расположен на высоте ~100 км, а с уменьшением высоты концентрация O резко уменьшается. Интервал высот атмосферы, в которой это излучение наиболее интенсивно (~300 рэлей в невозмущенных геофизических условиях), составляет 90–110 км. Свечение этого слоя имеет неоднородную горизонтальную структуру, связанную с наличием зон турбулентности в области мезопау-

зы. Размер пятен от 10 до 1000 км, средний размер ~100 км [Платов и др., 1989]. Поскольку яркость этого слоя велика, а длина волны 557.7 нм находится вблизи максимума чувствительности человеческого глаза, излучение этого слоя визуально уверенно наблюдается с борта космических станций.

Излучение с длиной волны ~630.0 нм с максимумом на ~300 км является второй линией атомарного кислорода, наблюдаемой в атмосфере. Это излучение соответствует запрещенным переходам из метастабильного состояния 1D в состояние 3P (триплет 639.2 (3P_0), 636.4 (3P_1), 630.0 (3P_2) нм). Эффективное время жизни возбужденного состояния ~130 с, что определяет возможность излучения таких атомов на высотах 250–350 км. В расположенных ниже, более плотных слоях атмосферы, происходит гашение этих линий в результате столкновений с молекулами атмосферных газов. Интенсивность свечения красной кислородной линии ночью в невозмущенных геофизических условиях составляет 50–100 рэлей, в утренние и вечерние сумерки ~1000 рэлей. Этот слой наблюдается визуально гораздо реже, чем первый слой, так как имеет меньшую яркость и чувствительность человеческого глаза в красной области спектра ниже, чем в зеленой. Таким образом, в видимом диапазоне спектра собственное свечение верхней атмосферы в основном сосредоточено в трех эмиссионных слоях, максимумы интенсивности которых находятся на высотах ~100, ~110 и ~300 км. В нижнем слое преобладает излучение натрия, в более высоких слоях — излучение зеленой и красной линий атомарного кислорода соответственно.

3. НАБЛЮДЕНИЯ ЭМИССИОННЫХ СЛОЕВ С МКС В 2017 г.

Для анализа были отобраны изображения из каталогов, размещенных ЕКА (Европейское космическое агентство) на сайтах [S1, S2].

Эмиссионные слои кислорода и натрия наблюдались как в средних широтах, так и в полярных регионах и хорошо видны практически на всех фотографиях.

Также был зарегистрирован очень интересный эффект: свечение узкого голубого слоя толщиной ~15 км на высотах тропосферы–стратосферы.

Следует отметить, что в 2017 г. не было ни одного случая наблюдения локальных светящихся слоев на высотах 20–30 км (аэрозольный слой Юнге). Такие слои наблюдались в 80-х гг. прошлого века, в частности во время выполнения программы ПСН на станции “Салют 7” в 1982 г. Это явление определялось рассеянием солнечного излучения капельками серной кислоты, выброшенными в стратосферу во время извержения

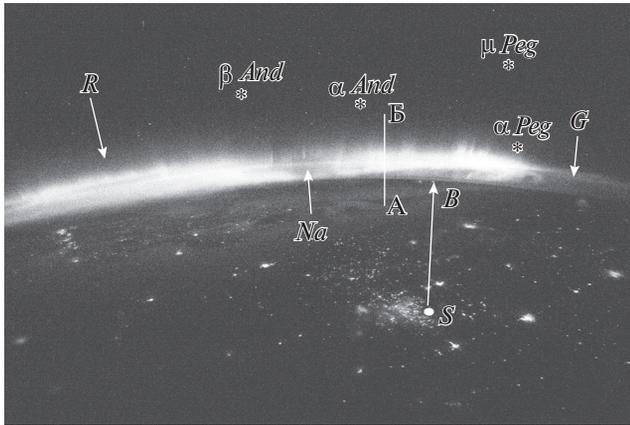


Рис. 4. Снимок получен над Канадой 3 марта 2017 г. *S* – положение Солнца; *R* – красный эмиссионный слой *G* – зеленый слой; *Na* – натриевый слой; *B* – тонкий голубой слой вблизи горизонта. *АВ* – линия фотометрического разреза (см. ниже). На снимке обозначено положение нескольких наиболее ярких звезд. Угол погружения Солнца под горизонт $\sim 17.5^\circ$; интервал высот красного слоя 160–280 км; высота натриевого слоя ~ 97 км, толщина ~ 12 км, высота зеленого кислородного слоя ~ 115 км. Толщина голубого слоя не превышает 20 км, высота земной тени $h^* \sim 45$ км.

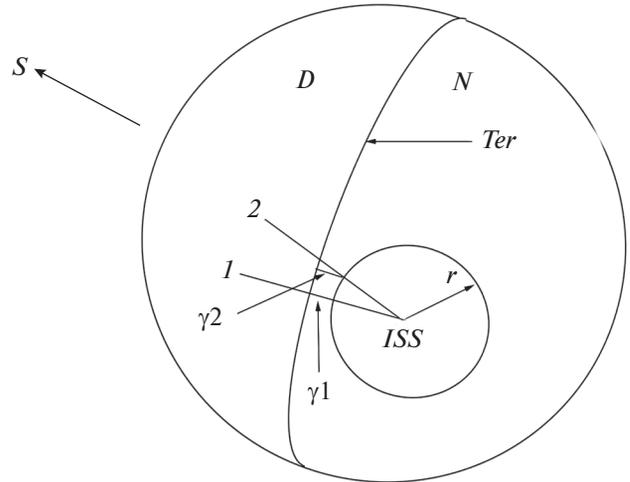


Рис. 5. Схема наблюдений синего слоя. *S* – направление к Солнцу, *D* – дневная сторона Земли (освещенная солнцем); *N* – ночная сторона; *Ter* – терминатор; *r* – расстояние до горизонта, видимого со станции *1-ISS-2* – сферический треугольник; γ_1 и γ_2 – фрагменты большого круга на поверхности Земли с угловыми размерами, соответствующими углу погружения Солнца.

На рисунках 2 и 3 показаны два изображения эмиссионных слоев, полученные с различной экспозицией.

4. ТОНКИЙ СИНИЙ СЛОЙ ВБЛИЗИ ГОРИЗОНТА

На рисунке 4 одновременно с изображением полярного сияния и эмиссионных слоев кислорода и натрия зарегистрировано свечение тонкого голубого слоя непосредственно над горизонтом. Схема определения геометрических параметров голубого слоя показана на рис. 5.

Интенсивность рассеянного излучения определяется количеством вещества вдоль луча зрения. Число молекул в трубке единичного сечения (толща атмосферы) вдоль линии визирования МКС-х определяется как $\Sigma(h^*) = \int_0^\infty N(z)dx$, $N(z)$ – концентрация молекул как функция высоты z в точке “ x ” – $z = \sqrt{(R + h^*)^2 + x^2} - R$. Значения $N(z)$ взяты из монографии [Аллен, 1977].

Толща атмосферы при наблюдении с поверхности Земли в зенит $\Sigma_0 = \int_0^\infty N(z)dx = 2.2 \times 10^{25} \text{ см}^{-2}$, а изменение $\Sigma(h^*)/\Sigma_0$ показана на рис. 6.

Толща атмосферы вдоль луча зрения, проходящего на высотах от 0 до 80 км над поверхностью Земли и, следовательно, яркость атмосферы, изменяется на 4 порядка. В зависимости от динамического диапазона используемой аппаратуры од-

новременно может быть зарегистрировано излучение слоя толщиной 15–25 км.

Например, яркость слоя с нижней границей $h^* = 45$ км, наблюдаемой с борта станции, в ~ 20 раз слабее яркости дневного неба в зените. Максимальная толщина голубого слоя на рис. 4 $\sim 0.6^\circ$, что соответствует ~ 22 км.

Сайт [S2] содержит несколько фотографий, на которых зафиксирован аналогичный синий слой вблизи горизонта. Кроме того, есть два видеопленки, демонстрирующие развитие таких слоев,

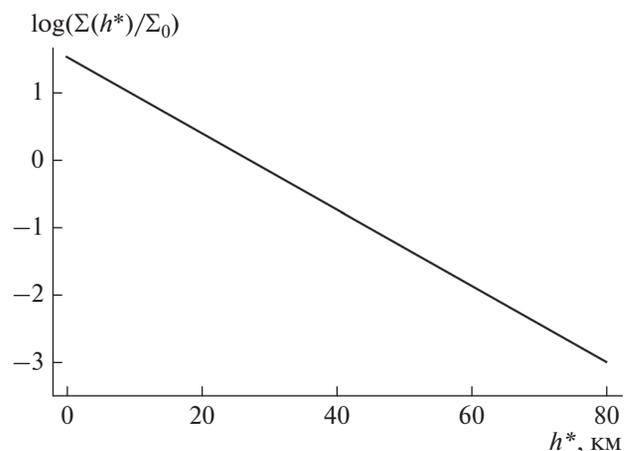


Рис. 6. Изменение толща атмосферы вдоль линии визирования МКС – х (рис. 1) в диапазоне высот h^* от 0 до 80 км.

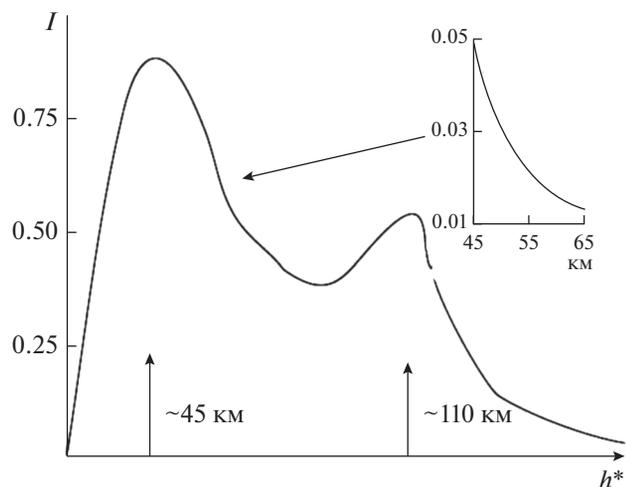


Рис. 7. Сглаженный фотометрический разрез эмиссионных слоев вдоль линии АБ (см. рис. 4) в синем цвете в сравнении с расчетным профилем яркости. По оси абсцисс высота над видимым горизонтом, по оси ординат — интенсивность свечения I в относительных единицах.

когда Солнце приближается к горизонту во время восхода. Два снимка из этой коллекции приведены на рис. 8а и 8б.

Уменьшение яркости слоя с расстоянием от центра светящейся области до его периферии соответствует увеличению угла погружения Солнца (т.е. увеличению высоты земной тени). Наблюдаемое свечение определяется рассеянием солнечного света в достаточно тонком слое атмосферы. Геометрические параметры таких слоев (высота нижней границы и толщина) зависят от угла погружения Солнца под горизонт и плотности атмосферы, а возможность регистрации свечения определяется чувствительностью и динамическим диапазоном приемной аппаратуры.

Синий цвет слоя определяется зависимостью интенсивности рассеянного света $I(\lambda)$ от длины волны. Для рэлеевского рассеяния $I \sim \lambda^{-4}$, то есть рассеяние синего света происходит в 5–7 раз интенсивнее, чем красного. Очень тонкий красноватый слой R^* на нижней границе синего слоя виден на многих изображениях атмосферных слоев (см. рис. 8). Такой эффект связан с рэлеевским покраснением солнечного излучения вблизи горизонта [Stellmacher and Koutchmy, 1974]. Это очень интересный, но трудно наблюдаемый эффект.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Наблюдаемое свечение тонкого синего слоя вблизи горизонта определяется рэлеевским рассеянием солнечного света в атмосфере Земли на высотах тропосфера — стратосфера. Это свечение

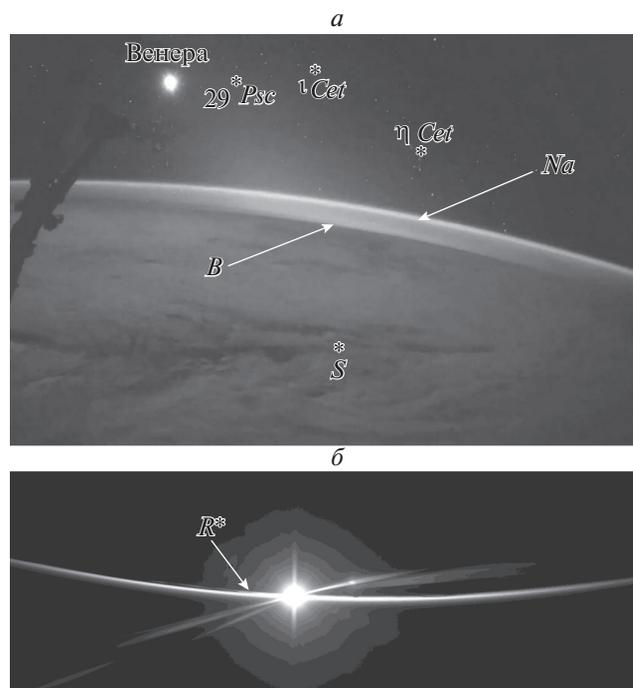


Рис. 8. Две фотографии тонких синих слоев у горизонта. (а) Кадр из фильма “Аврора Восход”, снятого 21 апреля 2017 г. над Калифорнией. Объекты на снимке: планета Венера; S — Солнце; B — голубой слой; Na — натриевый слой. Также обозначено положение нескольких звезд. Высота слоя $Na \sim 97$ км; угол погружения Солнца под горизонт $\sim 11.4^\circ$; высота нижней границы синего слоя над землей $h^* \sim 20$ км, толщина синего слоя ~ 15 км; (б) Снимок получен 12 марта 2017 г. в 18:46:44, над Тихим океаном. Время экспозиции 1/1250 с. Солнце практически в видимом горизонте. Зарегистрировано интенсивное голубое свечение тонкого атмосферного слоя, толщина которого не превышает ~ 10 км. R^* — красный очень тонкий слой на нижней границе синего атмосферного слоя.

может наблюдаться при углах погружения Солнца под горизонт до $\sim 20^\circ$.

При проведении наблюдений не было зарегистрировано свечение аэрозольных слоев Юнге, что свидетельствует о низком содержании пыли в средней атмосфере.

Результаты определения высоты эмиссионных слоев по различным фотографиям показывают, что свечение натрия локализовано в слое высотой 95–105 км; высота первого кислородного слоя 100–115 км; диапазон высот второго кислородного слоя составляет 150–330 км. Погрешность измерения высоты не превышает 5 км и в основном определяется дисторсией использованных объективов.

Проведение целенаправленных регулярных наблюдений свечения атмосферы на МКС позволит исследовать влияние геофизической обстановки и географического положения на параметры эмиссионных слоев.

6. БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы считают своим приятным долгом выразить благодарность наблюдателям, и особенно Т. Песке из ЕКА и КНЕС, который получил множество отличных цифровых снимков атмосферы вблизи горизонта Земли в сумеречных и ночных условиях во время 51 экспедиции на МКС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Аллен К.У. Астрофизические величины. М.: Мир, 446 с. 1977.
- Лазарев А.И., Коваленок В.В., Иванченков А.С., Авакян С.В. Атмосфера Земли из “Салют-6”. Россия. Л.: Гидрометеиздат, 207 с. 1981.
- 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.
- Семенов А.И., Платов Ю.В. Собственное свечение верхней атмосферы земли. Энциклопедия низкотемпературной плазмы. Тематический том 1–3: Ионосферная плазма. С. 164–175. 2008.
- Шефов Н.Н., Семенов А.И., Хомич В.Ю. Излучение верхней атмосферы – индикатор ее структуры и динамики. М.: ГЕОС, 740 с. 2006.
- Koutchmy S., Nikolsky G.M. The night sky from Salyut 7 // Sky and telescope. V. 65(1). P. 23–25. 1983.
- Stellmacher G., Koutchmy S. Study of low dispersion spectra: observation of weak low excitation emission lines in corona // Astron. Astrophys. V. 35. P. 43–48. 1974.
- S1 https://www.flickr.com/photos/thom_astro/34077040140/in_album-72157677847721745/y
- S2 https://www.flickr.com/photos/thom_astro/34335832025/in/photostream/