

**ЯРКОСТЬ НОЧНОГО НЕБА И СОБСТВЕННОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ
ВЕРХНЕЙ АТМОСФЕРЫ В РЕГИОНЕ ВОСТОЧНОЙ СИБИРИ ПОСЛЕ ПАДЕНИЯ
ЧЕЛЯБИНСКОГО МЕТЕОРИТА**

A.V. Михалев

**NIGHT SKY BRIGHTNESS AND INTRINSIC EMISSION OF THE UPPER ATMOSPHERE
IN EAST SIBERIA REGION AFTER CHELYABINSK METEORITE FALL**

A.V. Mikhalev

Приводятся результаты наблюдений яркости ночного неба и собственного излучения верхней атмосферы в эмиссии атомарного кислорода OI 557.7 нм в регионе Восточной Сибири после падения Челябинского метеорита. Отмечается увеличение яркости ночного неба (до 50 % относительно предшествующих ночей) в первые две ночи после падения. Эффект объясняется переносом продуктов взрыва метеороида на высотах стратосферы на большие расстояния с учетом сезонных направлений зональных ветров на этих высотах. Анализ вариаций интенсивности мезосферной эмиссии OI 557.7 нм выявил в первую ночь после падения метеорита изменение характеристик этой эмиссии, обычно регистрируемых после землетрясений (снижение средней ночной интенсивности эмиссии 557.7 нм, изменение ночных ходов и др.).

Ключевые слова: Челябинский метеорит, яркость ночного неба, излучение атмосферы

Results of observation of night sky brightness and intrinsic emission of the upper atmosphere in OI 557.7 nm emission in East Siberia region after Chelyabinsk meteorite fall are presented. One can note an increase in night sky brightness (up to 50 % relative to previous nights) during first two nights after the fall. The effect can be explained by the transport of meteoroid explosion products at stratospheric heights over large distances taking into account zonal wind directions at these heights. The analysis of variations of mesospheric OI 557.7 nm emission intensity during the first night after the meteoroid fall showed the changes in the emission characteristics usually registered after earthquakes (decrease of the mean night intensity of 557.7 nm emission, changes in night course, etc).

Key words: Chelyabinsk meteorite, night sky brightness, atmosphere emission.

Введение

Пролет в верхних слоях атмосферы искусственных и естественных космических объектов – метеоров и метеорных потоков, космических аппаратов и их фрагментов – может сопровождаться развитием на высотах средней и верхней атмосферы ряда явлений: образованием ударных и акусто-гравитационных волн, нагревом и ионизацией среды, модификацией ионосферы и изменением нейтрального состава атмосферы и физико-химических процессов на высотах взаимодействия метеорного вещества с атмосферой Земли и др. Указанные явления в ряде случаев приводят к появлению возмущений в собственном излучении верхней атмосферы Земли [Фишкова, Квавадзе, 1987; Beletsky et al., 2004, Mikhalev, 2011]. При этом условия возникновения, основные характеристики и механизмы возмущений оптического излучения выяснены только для некоторых реализующихся в верхней атмосфере геофизических ситуаций и объектов. Наиболее мощным по своему воздействию на атмосферу является феномен Тунгусского болида 30 июня 1908 г. [Бронштэн, 1987], когда над обширной территорией Европы и европейской части России отмечались аномально светлые ночи, которые объясняют поступлением в атмосферу большого количества метеорного и аэрозольного вещества, образовавшегося от взрыва метеороида в атмосфере, и рассеянием на нем излучения, в частности, многократно рассеянного солнечного излучения.

Одной из трудно объяснимых особенностей аномального свечения неба, сохраняющейся и по настоящее время, является расположение области свечения только западнее места падения и взрыва Тунгусского метеороида.

В связи с этим пролет и взрыв в атмосфере Земли над территорией России 15 февраля 2013 г. крупного

метеороида «Челябинск» представляет уникальное событие для физики и оптики атмосферы Земли и, в частности, для интерпретации оптических эффектов Тунгусского метеороида.

Аппаратура и методика наблюдений

В Геофизической обсерватории (ГФО) ИСЗФ СО РАН с 1997 г. по настоящее время проводятся регулярные наблюдения яркости ночного неба и собственного излучения верхней атмосферы Земли с помощью комплекса фотометров, спектрографов и CCD-камер. В феврале 2013 г. в ГФО с помощью спектрографов проводились мультиспектральные измерения излучения верхней атмосферы Земли в линиях атомарного кислорода OI 557.7 нм (максимум высоты высвечивания ~97 км) и 630 нм (~250 км), натрия NaI 589.0–589.6 нм (~92 км), в эмиссионных инфракрасных полосах молекул гидроксила OH (~87 км) и кислорода O₂ (~97 км). Интегральная яркость ночного неба измерялась с помощью цветной широкоугольной камеры FILIN-1C.

В настоящей работе представлены и анализируются оптические данные, полученные с помощью камеры и спектрографа SATI-1M в эмиссионной линии 557.7 нм. Камера FILIN-1C собрана на основе охлаждаемой цветной ПЗС-матрицы KODAK KAI-11002 (камера «Видеоскан-11002», разработка НПО «Видеоскан», <http://videoscan.ru/>). В качестве входного используется объектив «Мир-20» (фокусное расстояние 20 мм, относительное отверстие 1:3.5). Камера помещена в кожух с термостабилизацией, установлена на поворотной турели и ориентирована в северную часть небосвода в область полюса мира. Угловое поле зрения камеры FILIN-1C составляет ~90°, время экспозиции 300 с, разрешение матрицы 4004×2671 пикселей.

Спектрограф SATI-1М собран на основе спектрографа ИСП-51 (разработка ЛОМО) и цветной ПЗС-матрицы SONY ICX285AQ (камера «Видеоскан-285», разработка НПО «Видеоскан», <http://videoscan.ru/>). Для согласования размеров матрицы и размеров спектров в фокальной плоскости в качестве камерного установлен объектив «Гелиос-40» ($F=85$ мм, относительное отверстие 1:1.5). Для освещения входной щели спектрометра используется объектив Юпитер-3 ($F=50$ мм, 1:1.5). Рабочий спектральный диапазон спектрографа 400–700 нм, время экспозиции спектра 260 с.

Данные оптических наблюдений и их анализ.

Данные наблюдений с помощью цветной широкоугольной камеры FILIN-1C

На рис. 1 приведены данные наблюдений с помощью цветной широкоугольной CCD-камеры FILIN-1C в феврале 2013 г. в ГФО ИСЗФ СО РАН. Представлены средние за ночь суммарные яркости ночного неба в цветовых каналах RGB (верхние кривые) и фазы Луны для соответствующих дней (рис. 1, а). R-канал (красный) соответствует спектральному диапазону ~600–800 нм, G (зеленый) – ~500–600 нм, B (синий) – ~400–540 нм. Значения яркости приведены в относительных величинах и относятся к области северного полюса мира. На рис. 1, б приведены фрагменты исходных изображений яркости ночного неба для 14 февраля (слева) при высокой прозрачности атмосферы и 15 февраля 2013 г. (справа) при помутнении атмосферы для времени 13:01 и 13:06 UT соответственно.

Приведенная суммарная яркость ночного неба может быть обусловлена вкладом излучения от различных источников (Луны, звезд, планет, метеоров), рассеянным светом от этих объектов, собственным излучением верхней атмосферы, многократно рассеянным в области земной тени солнечным излучением и др. Считается, что в отсутствие Луны наибольший вклад в суммарную яркость ночного неба вносит собственное излучение верхней атмосферы Земли. Доля, вносимая каждой составляющей в суммарную яркость ночного неба, зависит от многих метео- и гелиогеофизических факторов. Изгиб на кривых яркости ночного неба на рис. 1, а, отмечаемый 15–16 февраля 2013 г., можно объяснить как увеличением доли рассеянного света нарастающей Луной, так и увеличением количества рассеивающего, в частности аэрозольного, вещества.

Можно высказать предположение, что взрыв метеороида «Челябинск» на стратосферных высотах мог вызвать поступление аэрозольной пыли в среднюю и верхнюю атмосферу. Тогда, как и для случая Тунгусского метеороида, можно было ожидать увеличения яркости ночного неба и снижения прозрачности атмосферы. И основной вопрос, возникающий в этом случае, заключается в размерах, расположении и эволюции области аэрозольного загрязнения.

Анализ приведенных на рис. 1 данных наблюдений позволяет высказать предварительную гипотезу о том, что увеличение суммарной яркости ночного неба в регионе Восточной Сибири в последующие после падения Челябинского метеорита ночи 15 и 16

февраля 2013 г. может быть связано и с его взрывом на стратосферных высотах. Увеличение яркости ночного неба для RGB-каналов составило до 50 % относительно предшествующих ночей.

Основная трудность объяснения, возникающая в этом случае, как и для Тунгусского метеороида, заключается в небольших временах (высоких скоростях) переноса аэрозольного загрязнения до региона наблюдения в Восточной Сибири, что невозможно объяснить только преимущественными ветрами на тропосферных высотах. Следует отметить, что Тунгусский метеороид, как и Челябинский, вошел в атмосферу в утренние часы по местному времени, а аномальное свечение атмосферы наблюдалось уже в первую ночь на расстояниях в несколько тысяч километров. Это требует скорости переноса аэрозольного загрязнения ~50–100 м/с, что не наблюдается на тропосферных высотах.

Объяснить эти противоречия можно, если допустить, что перенос аэрозольного загрязнения осуществлялся на стратосферных высотах. Анализ преобладающих зональных ветров в феврале 2013 г. [<http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/stratosphere>] позволяет говорить о возможных высоких скоростях переноса на высотах верхней стратосферы до 60–80 м/с и более с запада на восток в этот сезон года. Изменение направления зональных ветров на этих высотах с востока на запад в летний период может служить косвенным объяснением наблюдения аномального свечения в случае с Тунгусским метеороидом только западнее места его падения. В случае метеороида «Челябинск» возможную область аэрозольного загрязнения и увеличения яркости ночного неба следует ожидать восточнее места взрыва. При этом первые следы аэрозольного наполнения атмосферы в районе ГФО при скоростях переноса на стратосферных высотах ≥ 100 м/с можно было ожидать уже через 9–10 ч после взрыва метеороида (03:20 UT), т. е. фактически к началу оптическихочных наблюдений ~12 UT 15 февраля 2013 г.

Приведенные возможные скорости переноса аэрозоля от взрыва метеороида «Челябинск» совпадают с результатами лидарных наблюдений в эти дни стратосферных аэрозольных следов на российских лидарных станциях [Иванов и др., 2013; Николашкин, Титов, 2013]. В частности, в работе [Иванов и др., 2013] отмечается, что в анализируемый период времени на стратосферных высотах перемещение воздушных масс происходило в восточном направлении. Наибольшую скорость на высотах 42–44 км имели воздушные массы, которые, обогнув Северный полюс, к 18–19 февраля достигли Обнинска и Москвы. Согласно расчетам траекторий воздушных масс, выполненным сотрудниками Сибирского федерального университета [Иванов и др., 2013], переносимый атмосферной циркуляцией метеорный след мог достичь Якутска, расположенного восточнее Иркутска, уже к 15–16 февраля [Николашкин, Титов, 2013]. Тогда оценки средней скорости переноса воздушных масс для широт ~50° для указанных высот дают значения ~70–100 м/с и более.

Следует отметить, что идея переноса продуктов взрыва Тунгусского объекта на высотах верхней

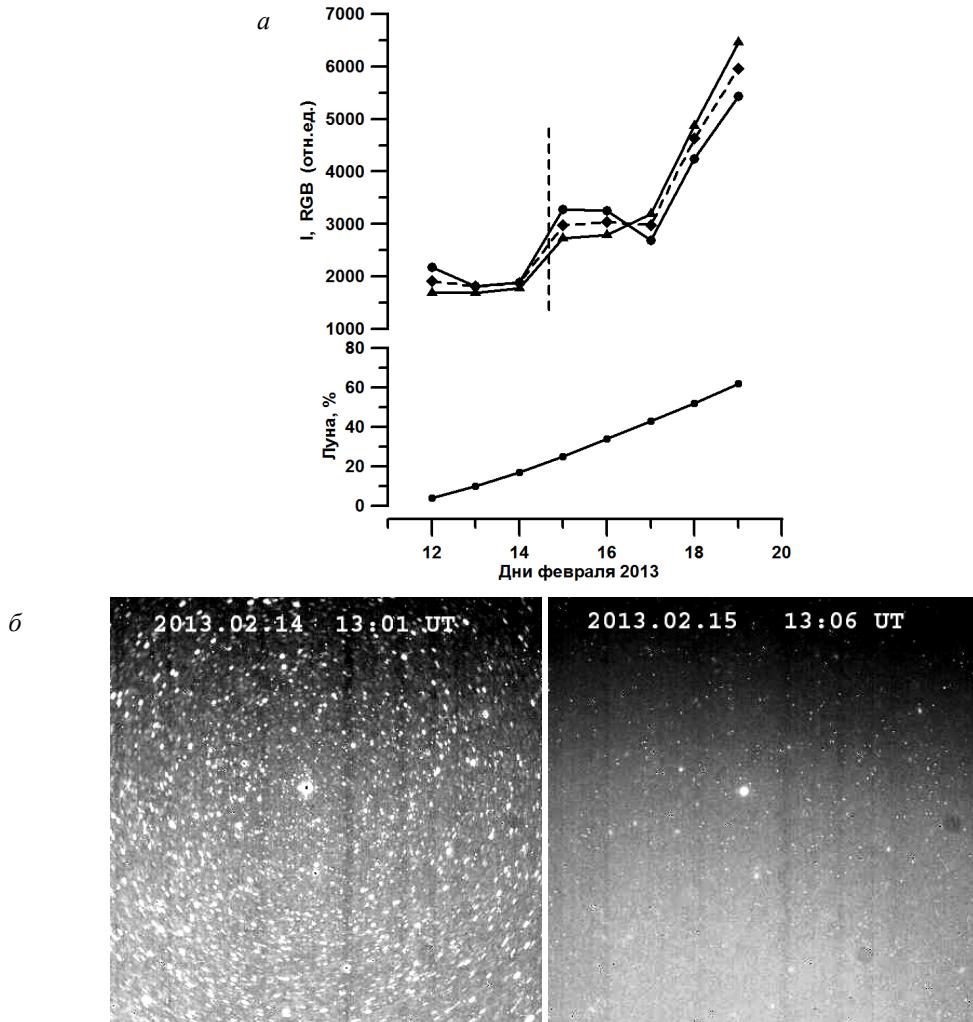


Рис. 1. Средние за ночь суммарные яркости ночного неба в цветовых каналах RGB (верхние кривые, кружки – R-канал, квадраты – G-канал, треугольники – B-канал) и фазы Луны (нижняя кривая) в феврале 2013 г (а); фрагменты исходных файлов изображений для 14 (слева) и 15 февраля 2013 г. (б). В центре изображений – Полярная звезда.

атмосферы высказывалась и ранее (например, [Иванов, 1967]).

Данные наблюдений спектрометра SATI-1M

На рис. 2 приведены данные наблюдений средних ночных значений собственного излучения верхней атмосфера Земли в эмиссионной линии атомарного кислорода OI 557.7 нм (высоты высвечивания ~85–115 км), полученные с помощью патрульного спектрометра SATI-1M; на рис. 3 – данные наблюдений внутрисуточных вариаций собственного излучения верхней атмосферы Земли в линии OI 557.7 нм.

Анализ данных, приведенных на рис. 2 и 3, позволяет выявить две особенности в вариациях интенсивности атмосферной эмиссии 557.7 нм: минимальное относительно предыдущих и последующих ночей среднее значение интенсивности эмиссии 557.7 нм 15 февраля 2013 г. и изменение ночного хода этой эмиссии в эту и последующие ночи. Указанные изменения характеристик этой эмиссии (снижение средней ночной интенсивности, изменение типа ночного хода эмиссии 557.7 нм) иногда отмечаются после землетрясений [Fishkova et al., 1985; Mikhalev et al., 2001].

В связи с этим интересно отметить, что падение метеороида «Челябинск» сопровождалось сейсмическим эффектом, эквивалентным землетрясению магнитудой 3–4 балла [Бернгардт и др., 2013; http://ru.wikipedia.org/wiki/Падение_метеорита_Челябинск]. Предыдущее подобное явление – падение Тунгусского метеороида – оценивалось в 5.0 баллов. К настоящему времени не определены механизмы влияния сейсмической активности на эмиссию верхней атмосферы – высказываются лишь отдельные гипо-

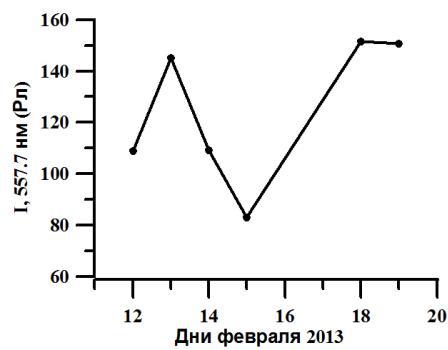


Рис. 2. Излучение верхней атмосферы Земли в эмиссионной линии атомарного кислорода OI 557.7 нм 12–19 февраля 2013 г.

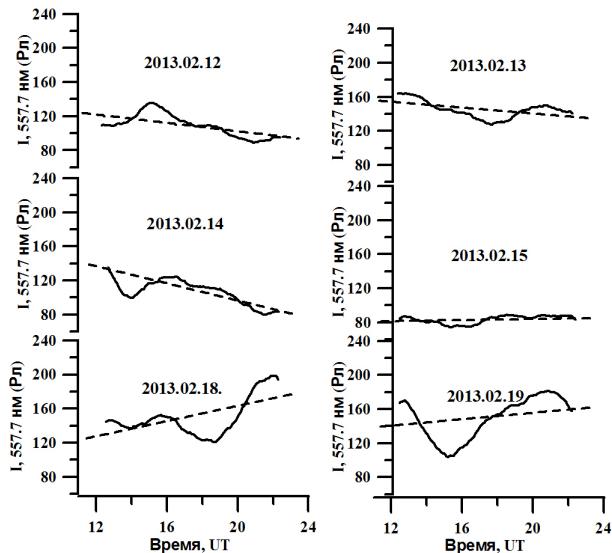


Рис. 3. Внутрисуточные вариации собственного излучения верхней атмосферы Земли в эмиссионной линии атомарного кислорода OI 557.7 нм.

тезы (например, [Fishkova et al., 1985]). Пространственный масштаб возмущений параметров верхней атмосферы и ионосфера при землетрясениях может достигать сотен и тысяч километров [Липеровский и др., 1990].

В связи с наблюдаемым изменением ночного хода эмиссии 557.7 нм интересным представляется факт, отмечаемый в работе [Фишкова, 1983], о подобииочных вариаций эмиссии 557.7 нм на станциях, расположенных на одной широте, но разнесенных по долготе на тысячи километров.

С учетом изложенного можно допустить, что наблюдаемые в вариациях эмиссии 557.7 нм особенности, возможно, обусловлены сейсмическим эффектом от падения метеорита «Челябинск».

Выводы

1. В межсуточных вариациях суммарной яркости ночного неба в регионе Восточной Сибири в первые после падения метеорита «Челябинск» ночи 15/16 и 16/17 февраля отмечается увеличение яркости ночного неба (до 50 %) относительно предшествующих ночей.

2. Имеющиеся в настоящее время экспериментальные данные наблюдений атмосферных параметров и их предварительный анализ пока не позволяют однозначно связать указанное увеличение яркости ночного неба с полетом метеорита «Челябинск», так как наблюданное помутнение атмосферы может наблюдаваться и в обычных метеорологических условиях. Между тем, в предположении возможного переноса аэрозольных продуктов взрывов Тунгусского и Челябинского метеороидов на высотах стратосферы – нижней мезосфере (с учетом регистрируемых на этих высотах зональных скоростей ветров и их сезонного изменения направлений) представляется возможным допустить следующее:

- быстрый перенос возможных продуктов взрывов на большие расстояния;
- западное расположение зоны аномального свечения ночного неба относительно места падения Тунгусского метеороида (летом направление зональных ветров с востока на запад);

- возможное аэрозольное наполнение стратосферы – нижней мезосфере во время взрыва метеороида «Челябинск» и преимущественное восточное направление переноса продуктов взрыва на большие расстояния, включая и регион Восточной Сибири.

3. Анализ вариаций интенсивности атмосферной эмиссии OI 557.7 нм выявил в первую после падения метеорида «Челябинск» ночь 15/16 февраля 2013 г. изменение характеристик этой эмиссии, подобное изменениям, регистрируемым после землетрясений.

Регулярные ежедневные измерения собственного излучения верхней атмосферы Земли, используемые в настоящей работе, проводились в рамках проекта № ОНЗ-8.3 Программы ОНЗ РАН № 8, междисциплинарного интеграционного проекта СО РАН № 11 и проекта РФФИ № 12-05-00024-а.

Работа выполнена в рамках гранта № НШ-2942.2014.5 президента РФ государственной поддержки ведущих научных школ РФ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Бернгардт О.И., Добрынина А.А., Жеребцов Г.А. и др. Геофизические явления, сопровождающие падение Челябинского метеорида // Докл. Академии наук. 2013. Т. 452, № 2. С. 205–207.

Бронштэн В.А. Метеоры, метеориты, метеороиды. М.: Наука, 1987. 173 с.

Иванов К.Г. О природе воздействия Тунгусского падения на верхнюю атмосферу, геомагнитное поле и свечение ночного неба // Геомагнетизм и аэрономия. 1967. Т. VII, № 6. С. 1031–1035.

Иванов В.Н., Зубачев Д.С., Коршунов В.А., и др. Лидарные наблюдения стратосферных аэрозольных следов от Чебаркульского метеорита // Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы: Сб. докл. XIX Международного симпозиума [Электронный ресурс]. Томск: Издательство ИОА СО РАН, 2013. D231–D234.

Липеровский В.А., Алимов О.А., Шалимов С.Л., и др. Исследование F-области ионосферы перед землетрясениями // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. 1990. № 12. С. 77–86.

Николашкин С.В., Титов. С.В. Регистрация лидаром аэрозольного слоя от Челябинского болида над Якутском // Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы: Сб. докл. XIX Международного симпозиума [Электронный ресурс]. Томск: Издательство ИОА СО РАН, 2013. D337–D340.

Фишкова Л.М., Квавадзе К.Д. Об эффекте метеорной активности в ночном излучении средней атмосферы // Геомагнетизм и аэрономия. 1987. Т. 27, № 5. С. 858–860.

Фишкова Л.М. Ночное излучение среднеширотной верхней атмосферы Земли. Тбилиси: Мецниереба, 1983. 271 с.

Beletsky A.B., Gress O.G., Mikhalev A.V., et al. Nightglow behavior during the 16–18 November 2001 passage of the Leonids meteor stream // Adv. Space Res. 2004. V. 33, N 9. P. 1486–1490.

Fishkova L.M., Gokhberg M.B., Pilipenko V.A. Relationship between night airglow and seismic activity // Ann. Geophys. 1985. V. 3, N. 6. P. 689–694.

Mikhalev A.V., Popov M.S., Kazimirovsky E.S. The manifestation of seismic activity in 557.7 nm emission variations of the Earth's upper atmosphere // Adv. Space Res. 2001. V. 27, N 6–7. P. 1105–1108.

Mikhalev A.V. Midlatitude airglow during heliogeophysical disturbances // Geomagnetism and Aeronomy. 2011. V. 51, N 7. P. 974–978.

<http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/stratosphere>.

http://ru.wikipedia.org/wiki/Падение_метеорита_Челябинск.