

УДК 551.510

Оптические характеристики ночного неба в Восточной Сибири после падения Челябинского метеорита.

I. Яркость ночного неба

А.В. Михалев¹, С.В. Подлесный¹, П.В. Стоева^{2*}

¹Институт солнечно-земной физики СО РАН
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 126а, Россия

²Институт космических исследований и технологий Болгарской академии наук
1113, г. София, ул. Академика Георги Бончев, бл. 1, Болгария

Поступила в редакцию 17.03.2014 г.

Приводятся результаты наблюдений яркости ночного неба в регионе Восточной Сибири после падения метеорита «Челябинск» 15 февраля 2013 г. В межсуточных вариациях яркости ночного неба в первые ночи 15/16 и 16/17 февраля после падения этого метеорита зарегистрировано изменение, включающее как увеличение, так и уменьшение средних за ночь значений яркости ночного неба относительно предшествующих (фоновых) ночей. Отмечается рост яркости ночного неба в конце февраля–начале марта. Отмеченный рост яркости ночного неба не наблюдался в предшествующие годы и не является типичным для сезонного хода интенсивности сплошного спектра свечения ночного неба.

Ключевые слова: Челябинский метеорит, яркость ночного неба; Chelyabinsk meteorite, night sky brightness.

Введение

Полет в верхних слоях атмосферы искусственных и естественных космических объектов – метеоров и метеорных потоков, космических аппаратов и их фрагментов, может сопровождаться на высотах средней и верхней атмосферы рядом явлений: образованием ударных и акустико-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 вариаций оптических характеристик атмосферы и возмущений в собственном излучении верхней атмосферы Земли [1–4]. Наиболее мощным по своему воздействию на атмосферу является феномен Тунгусского болида 30 июня 1908 г. [5], когда над обширной территорией Европы и европейской частью России отмечались аномально светлые ночи. Основное объяснение этого явления связывают с поступлением в атмосферу большого количества метеорного вещества, возникшего 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 достаточно долгое время, являлось

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» – это уникальное событие для физики и оптики атмосферы Земли и, в частности, для интерпретации оптических эффектов Тунгусского метеороида.

В настоящей статье приводятся данные наблюдений и анализ наблюдаемых особенностей яркости ночного неба в регионе Восточной Сибири в первые дни и последующие месяцы после падения Челябинского метеорита 15 февраля 2013 г.

1. Аппаратура и методика наблюдений

В Геофизической обсерватории (ГФО) ИСЗФ СО РАН (52° с.ш., 103° в.д.) с 1997 г. и по настоящее время проводятся регулярные наблюдения яркости ночного неба и собственного излучения верхней атмосферы Земли. Эти наблюдения осуществляются с помощью комплекса фотометров, спектрографов и ССD-камер. В феврале 2013 г. в ГФО ИСЗФ СО РАН проводились измерения яркости ночного неба и собственного излучения верхней атмосферы Земли в линиях атомарного кислорода ОI 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 гидроксидов ОН (~87 км) и кислорода О₂ (~97 км). Интегральная яркость ночного неба

* Александр Васильевич Михалев (mikhalev@iszf.irk.ru); Степан Витальевич Подлесный (step8907@mail.ru); Пенка Влайкова Стоева (penk@abv.bg).

измерялась с помощью цветной широкоугольной камеры FILIN-1С.

В настоящей статье представлены и анализируются оптические данные камеры FILIN-1С, собранной на основе охлаждаемой цветной ПЗС-матрицы KODAK KAI-11002 (камера ВИДЕОСКАН-11002, разработка НПО «ВИДЕОСКАН», <http://videoscan.ru/>). В качестве входного объектива 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-1С составляет примерно 90°, время экспозиции 300 с, разрешение матрицы 4004×2671 пикселей.

2. Данные оптических наблюдений и их анализ

2.1. Эффекты в первые дни после падения Челябинского метеорита

На рис. 1 приведены усредненные за ночь данные наблюдений яркости ночного неба цветной широкоугольной CCD-камеры FILIN-1С с 12 по 19 февраля 2013 г. в ГФО ИСЗФ СО РАН в цветовых каналах R , G и B (верхние кривые) и фазы Луны для соответствующих дней (нижняя кривая).

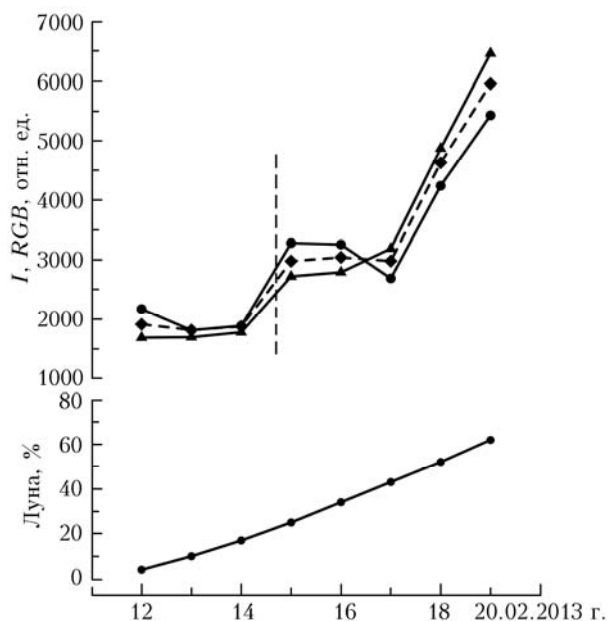


Рис. 1. Средние за ночь суммарные яркости ночного неба в каналах R , G и B (верхние кривые: кружки – R , ромбы – G , треугольники – B) и фазы Луны (нижняя кривая) в феврале 2013 г.

Средние яркости ночного неба определялись в фиксированные интервалы времени, практически за весь ночной период наблюдения для каждой ночи, включая сумеречные интервалы времени и интервалы времени с растущей Луной на небольших

высотах над горизонтом. Для анализируемых дат временной интервал усреднения составил диапазон от ~19:00 до ~06:00 местного солнечного времени (LST). Канал R соответствует спектральному диапазону ~600–800 нм, G ~500–600 нм, B ~400–540 нм. Значения яркости приведены в относительных величинах и соответствует области Полюса мира. Пространственное усреднение значений яркости ночного неба, приведенных на рис. 1, составляет 100×100 пикселей ($\sim 5 \times 5^\circ$).

Указанная процедура получения средних значений яркости ночного неба использовалась в работах [6, 7] при анализе возможных оптических эффектов падения метеорита «Челябинск».

На рис. 2 представлены средние за ночь яркости ночного неба в цветовых каналах R , G и B с 12 по 19 февраля 2013 г., но при усреднении исключались сумеречные интервалы времени и интервалы времени с Луной выше горизонта.

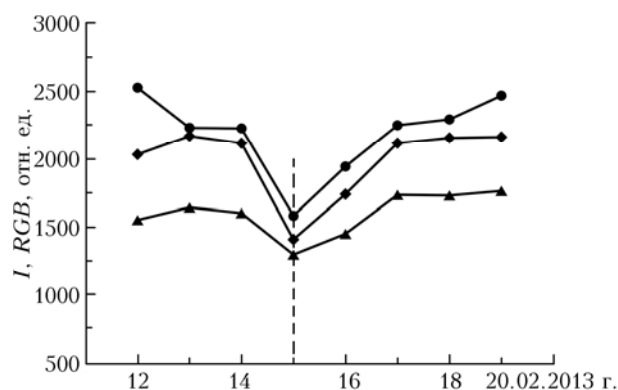


Рис. 2. Средние яркости ночного неба в безлунные интервалы в каналах R (кружки), G (ромбы) и B (треугольники) в феврале 2013 г.

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 солнечного излучения и других объектов. 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 метеоро- и гелиогеофизических факторов.

Изгиб на кривых яркости ночного неба на рис. 1, отмечаемый 15–16 февраля 2013 г., может интерпретироваться как увеличением доли рассеянного света нарастающей Луны, так и увеличением количества рассеивающего, в частности, аэрозольного вещества. Снижение яркости ночного неба, наблюдаемого 15 февраля 2013 г., на рис. 2 также может служить экспериментальным подтверждением увеличения аэрозоля в ночь 15/16 февраля. Интерпретация кривых рис. 2, в отсутствие вклада рассеянного лунного и сумеречного света, может быть связана с аэрозольным поглощением собственного излучения верхней атмосферы.

Можно высказать предположение, что взрыв метеороида «Челябинск» на стратосферных высотах мог вызвать поступление аэрозольной пыли в среднюю и верхнюю атмосферу. В этом случае, как и в случае Тунгусского метеороида, можно было ожидать увеличения яркости ночного неба при наличии источника подсветки и снижения прозрачности атмосферы. Для Тунгусского феномена источником подсветки могло служить рассеянное солнечное излучение в период белых ночей, а для метеороида «Челябинск» — рассеянное лунное излучение. И основной вопрос, возникающий в этом случае, заключается в размерах, расположении и эволюции области аэрозольного загрязнения.

Анализ приведенных на рис. 1 данных наблюдений позволил высказать в работах [6, 7] предположение, 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 со взрывом на стратосферных высотах метеороида «Челябинск». Увеличение яркости ночного неба для каналов R , G и B составило до 50% относительно предшествующих ночей.

Учет данных, представленных на рис. 2, требует некоторого уточнения относительно результата, связанного с увеличением яркости ночного неба 15–16 февраля 2013 г. Вероятно, необходимо говорить не только об увеличении яркости ночного неба в анализируемые дни, но и о снижении яркости в безлунные ночные интервалы времени относительно предыдущих (фоновых) дней.

Основная трудность, возникающая при анализе представленных данных, как и в случае Тунгусского метеороида, заключается в небольших временах (высоких скоростях) переноса аэрозольного загрязнения до региона наблюдения в Восточной Сибири, которое невозможно объяснить только преимущественными ветрами на тропосферных высотах. Следует отметить, что и Тунгусский, и Челябинский метеориты вошли в атмосферу в утренние часы по местному времени, а аномальное свечение атмосферы наблюдалось уже в первую ночь на расстояниях в несколько тысяч километров. Для этого требуется скорость переноса аэрозольного загрязнения до ~ 50 – 100 м/с, что невозможно на тропосферных высотах. Поэтому можно предположить, что перенос аэрозольного загрязнения осуществлялся на стратосферных высотах. Анализ преобладающих зональных ветров на стратосферных высотах в феврале 2013 г. [8] позволяет говорить о возможных больших скоростях переноса на высотах верхней стратосферы до 60 – 80 м/с и более с запада на восток в зимний 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 возможное увеличение яркости ночного неба) следует ожидать

восточней места его взрыва. При этом первые следы аэрозольного наполнения атмосферы в районе ГФО ИСЗФ при скоростях переноса на стратосферных высотах ≥ 100 м/с можно было ожидать уже через 9–10 ч после взрыва метеороида «Челябинск» (03:20 UT), т.е. фактически к началу оптических ночных наблюдений $\sim 12:00$ UT 15 февраля 2013 г.

Приведенные возможные скорости переноса аэрозоля от места взрыва метеороида «Челябинск» совпадают с результатами лидарных наблюдений в эти дни стратосферных аэрозольных следов на российских лидарных станциях [9, 10]. В частности, в работе [9] отмечается, что в анализируемый период времени на стратосферных высотах перемещение воздушных масс происходило в восточном направлении. Наибольшую скорость воздушные массы имели на высотах 42–44 км. Они, обогнув земной шар, к 18–19 февраля достигли Обнинска и Москвы. Согласно расчетам траекторий воздушных масс, выполненным сотрудниками Сибирского федерального университета [9], переносимый атмосферной циркуляцией метеороидный след мог достичь Якутска, расположенного восточней Иркутска, уже к 15–16 февраля [10]. Тогда оценки средней скорости переноса воздушных масс для широт $\sim 50^\circ$ и указанных высот дают значения ~ 70 – 100 м/с и более.

Следует отметить, что идея переноса продуктов взрыва Тунгусского объекта на высотах верхней атмосферы высказывалась и ранее (см., например, [11]).

2.2. Эффекты в последующие месяцы после падения Челябинского метеорита (долгопериодные эффекты)

В работах [1, 12] опубликованы данные наблюдений, указывающие на сохранение существенного дополнительного аэрозольного наполнения атмосферы Северного полушария в течение первых месяцев после падения Челябинского метеорита 15 февраля 2013 г. Эти результаты были получены прибором для картирования профиля озона OMPS/LP, установленным на спутнике Suomi [1], а также оптическим спектрографом и системой инфракрасного изображения OSIRIS на спутнике Odin [12]. Дополнительное аэрозольное наполнение наблюдалось на высотах выше аэрозольного слоя Юнге и представляло собой глобальный тор на высотах между 25 и 45 км вдоль широт 50 – 70° Северного полушария. Данные спутника Suomi указывали на величину зональной скорости переноса выше 85 м/с, что подтверждалось и результатами моделирования. Аэрозоль со скоростью около 90 м в день опускался к слою Юнге.

В связи с этим нами был проведен анализ вариаций яркости ночного неба в ГФО ИСЗФ СО РАН на больших временных масштабах. На рис. 3 представлены средние за ночь яркости ночного неба в канале R за 2010–2013 гг. в период с 30-го по 100-й день года, зарегистрированные в ГФО ИСЗФ СО РАН, и для сравнения ход интенсивности сплошного спектра на длине волны 605 нм по данным среднеширотной станции Абастумани [13], полученный усреднением данных наблюдений в 1958–1969 гг.

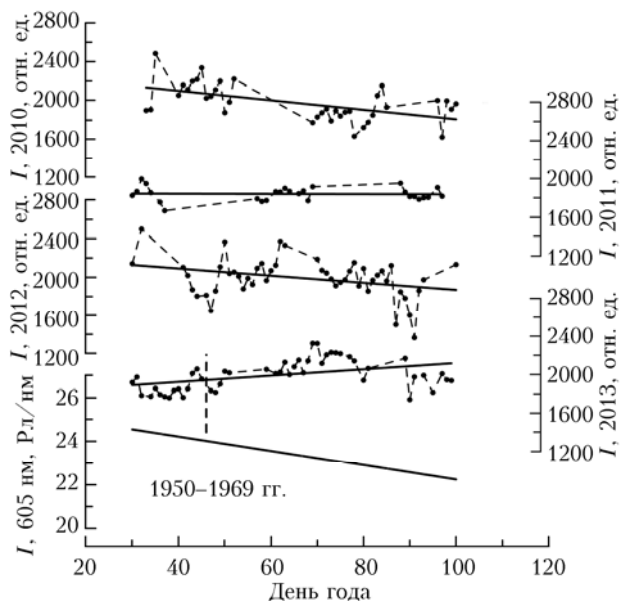


Рис. 3. Средние за ночь яркости ночного неба в канале R за 2010–2013 гг. и интенсивность сплошного спектра на длине волны 605 нм (нижний график)

Точками и штриховыми кривыми обозначены средние за ночь яркости ночного неба, прямыми линиями — линейная регрессия. Сопоставление анализируемых данных с данными сплошного спектра свечения ночного неба обусловлено тем, что излучение, регистрируемое в R -, G - и B -каналах цветной CCD-камеры, в большей степени обусловлено континуумом собственного свечения верхней атмосферы (сплошным спектром), так как при больших спектральных интервалах регистрации (~100–150 нм) континуум становится основным компонентом в свечении ночной атмосферы [13]. Согласно [13] в сезонном ходе интенсивности сплошного спектра свечения ночного неба в начале года типичным является его снижение (нижняя линия, рис. 3). Аналогичная тенденция отмечается и для яркости ночного неба по данным ГФО в 2010–2012 гг.

В то же время в 2013 г. эта тенденция нарушается (при линейной интерполяции данных наблюдений), указывая на увеличение яркости ночного неба на интервале с 40-го по 80-й день. На рис. 4 показана яркость ночного неба в R -канале цветной CCD-камеры при усреднении за 15 дней в 2013 г. в сравнении с аналогичными усредненными данными за предыдущие 3 года. Приведенные на рис. 4 данные получены нормированием на первые средние значения по 15 дням для каждого года (нормировка на начало года). Аналогичная тенденция наблюдается и для каналов G и B .

Таким образом, данные наблюдений яркости ночного неба в ГФО в 2013 г. указывают на ее увеличение во второй половине февраля — марте по сравнению с данными в январе—начале февраля. Отмеченное увеличение яркости ночного неба не наблюдалось в предшествующие годы и не является типичным для сезонного хода интенсивности сплошного спектра свечения ночного неба.

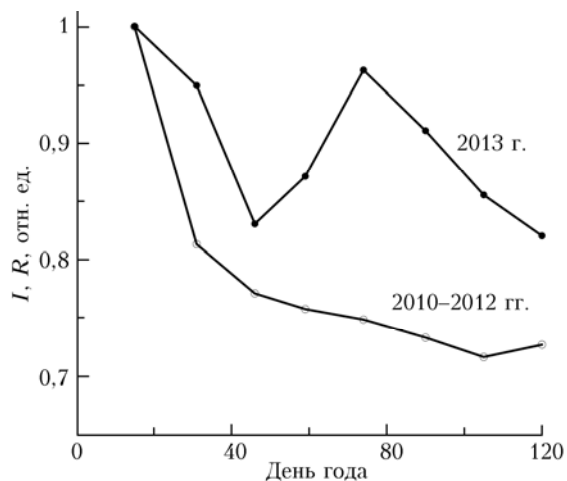


Рис. 4. Поведение яркости ночного неба в канале R CCD-камеры за 2013 г. и предыдущие 3 года (усредненные по 15 дням)

Заключение

1. В межсуточных вариациях яркости ночного неба, наблюдаемой в регионе Восточной Сибири, в первые после падения метеорита «Челябинск» ночи 15/16 и 16/17 февраля отмечаются изменения яркости ночного неба относительно предшествующих (фоновых) ночей: увеличение средних за ночь значений яркости ночного неба, включающих частично сумеречные интервалы времени и интервалы времени с нарастающей Луной; уменьшение средней яркости ночного неба, определяемой только в ночные безлунные интервалы времени.

Отмечаемые изменения яркости ночного неба могут являться следствием увеличения содержания аэрозольного вещества, предположительно связанное со взрывом метеороида «Челябинск».

2. В предположении возможного переноса аэрозольных продуктов взрыва Тунгусского и Челябинского метеороидов на высотах стратосферы — нижней мезосферы (с учетом регистрируемых на этих высотах зональных скоростей ветров и их сезонного изменения направлений) представляется возможным интерпретация: «быстрого» переноса возможных продуктов взрывов на большие расстояния; западного расположения зоны аномального свечения ночного неба относительно места падения Тунгусского метеороида (летом направление зональных ветров с востока на запад); возможного аэрозольного наполнения стратосферы — нижней мезосферы во время взрыва метеороида «Челябинск» и преимущественного восточного направления переноса продуктов взрыва на большие расстояния, включая и регион Восточной Сибири.

3. По данным наблюдений яркости ночного неба в ГФО в 2013 г. отмечается ее увеличение в конце февраля — начале марта. Отмеченное увеличение яркости ночного неба не наблюдалось в предшествующие годы и не является типичным для сезонного хода интенсивности сплошного спектра свечения ночного неба.

Работа выполнена в рамках гранта № НШ-2942.2014.5 Президента РФ государственной поддержки ведущих научных школ РФ и Российско-болгарского проекта «Атмос». Регулярные ежедневные измерения собственного излучения верхней атмосферы Земли, используемые в настоящей статье, проводились в рамках проекта РФФИ № 12-05-00024-а.

1. Gorkavyi N., Rault D., Newman P., Silva A., Dudorov A. New stratospheric dust belt due to the Chelyabinsk bolide // *Geophys. Res. Lett.* 2013. V. 40, N 17. P. 4728–4733. DOI: 10.1002/grl.50788.
2. Фишкова Л.М., Квавадзе К.Д. Об эффекте метеорной активности в ночном излучении средней атмосферы // *Геомagnet. и аэроном.* 1987. Т. 27, № 5. С. 858–860.
3. Beletsky A.B., Gress O.G., Mikhalev A.V., Shalin A.Yu., Potapov A.S. 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.
4. Mikhalev A.V. Midlatitude airglow during heliogeophysical disturbances // *Geomagnet. Aeronom.* 2011. V. 51, N 7. P. 974–978.
5. Бронштэн В.А. Метеоры, метеориты, метеороиды. М.: Наука, 1987. 173 с.
6. Бернгардт О.И., Добрынина А.А., Жеребцов Г.А., Михалев А.В., Перевалова Н.П., Ратовский К.Г., Рахматулин Р.А., Саньков В.А., Сорокин А.Г. Геофизические явления, сопровождающие падение Челябин-

ского метеороида // *Докл. РАН.* 2013. Т. 452, № 2. С. 205–207.

7. Михалев А.В. Яркость ночного неба и собственное излучение верхней атмосферы в регионе Восточной Сибири после падения Челябинского метеорита // *Солнечно-земная физика.* 2013. Вып. 24. С. 54–57.
8. URL: <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/stratosphere/>
9. Иванов В.Н., Зубачев Д.С., Коршунов В.А., Лапшин В.Б., Иванов М.С., Галкин К.А., Губко П.А., Антонов Д.Л., Тулинов Г.Ф., Черемисин А.А., Новиков П.В., Николашкин С.В., Маричев В.Н. Лидарные наблюдения стратосферных аэрозольных следов от Чебаркульского метеорита // *Оптика атмосфер. и океана. Физ. атмосфер.: Сб. докл. XIX Междунар. симпози. [Электронный ресурс].* Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2013. D231–D234.
10. Николашкин С.В., Тутов С.В. Регистрация лидаром аэрозольного слоя от Челябинского болида над Якутском // *Оптика атмосфер. и океана. Физ. атмосфер.: Сб. докл. XIX Междунар. симпози. [Электронный ресурс].* Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2013, D337–D340.
11. Иванов К.Г. О природе воздействия Тунгусского падения на верхнюю атмосферу, геомагнитное поле и свечение ночного неба // *Геомagnet. и аэроном.* 1967. Т. 7, № 6. С. 1031–1035.
12. Rieger L.A., Bourassa A.E., Degenstein D.A. Odin-OSIRIS detection of the Chelyabinsk Meteor // *Atmos. Meas. Technol. Discuss.* 2013. V. 6, N 5. P. 8435–8443. DOI: 10.5194/amtd-6-8435-2013.
13. Фишкова Л.М. Ночное излучение среднеширотной верхней атмосферы Земли. Тбилиси: Мецниереба, 1983. 271 с.

A.V. Mikhalev, S.V. Podlesnyi, P.V. Stoeva. Optical characteristics of the night sky over Eastern Siberia after the Chelyabinsk meteorite fall. I. Night sky brightness.

We present observation results of the night sky brightness in Eastern Siberia after the Chelyabinsk meteorite fall on February 15, 2013. During the first nights following the Chelyabinsk meteorite fall (February 15/16 and 16/17), diurnal variations in the night sky brightness showed both an increase and a decrease in average night values of the night sky brightness relative to the preceding (background) nights. There was an increase in brightness of the night sky in late February – early March. The increase in brightness of the night sky was not observed in previous years and was atypical for the seasonal variations in intensity of the continuous spectrum of night airglow.