

Наблюдение зеркального отражения освещенной подстилающей поверхности облачным слоем из ледяных пластинок

А.М. Морозов, В.П. Галилейский, А.И. Елизаров, Д.В. Кокарев*

*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1*

Поступила в редакцию 24.12.2015 г.

В работе сообщается о наблюдении зеркального отражения освещенной подстилающей поверхности облачным слоем горизонтально ориентированных ледяных пластинок. Описываются условия и средства наблюдения этого явления. Приводятся некоторые оценки характеристик отражающего слоя облачности, полученные на основе этих наблюдений, а также фотоматериалы, иллюстрирующие явление.

Ключевые слова: облачность, горизонтально ориентированные ледяные пластинки, зеркальное отражение, освещенная подстилающая поверхность; overcast, horizontally oriented ice plates, mirror, illuminated underlying surface.

Панорамно-оптическая станция (ПОС) TomSky — это аппаратно-программный комплекс круглосуточного оптического наблюдения пространства в пределах видимой полусферы неба. В основе этого устройства направленная вертикально вверх цифровая фотокамера с широкоугольным объективом типа FishEye с полем зрения $180^\circ \times 180^\circ$, что позволяет обозревать одновременно всю видимую полусферу. В продолжение работ [1–12] ведется техническая проработка устройства, а также разработка методов обработки панорамных изображений небосвода с целью оценки оптического состояния окружающей атмосферы и облачности, условий и прогноза состояния видимости через атмосферу для наблюдений заатмосферных объектов. Объектами наблюдения являются:

— поле яркости неба и состояние облачности (балл, направление и скорость перемещения облачного поля);

— атмосферно-оптические явления (радуги, гало, серебристые облака, полярные сияния и др.);

— самолеты, спутники, метеоры, болиды.

В процессе наблюдений ПОС выдает цветные RGB-изображения небосвода с разрешением по цвету 8 (или 14) бит на цветовой канал и пространственным угловым разрешением 3–5 угл. мин. Изображения неба автоматически записываются в базу данных на сервер ПОС и обрабатываются с целью получения необходимой информации об оптическом состоянии неба. Круглосуточные наблюдения с помощью ПОС начались с марта 2015 г.

За последнее время станцией зарегистрировано множество событий как атмосферно-оптического (гало, радуги), заатмосферного (полярные сияния, метеоры), так и техногенного происхождения (запуски ракет, пролеты самолетов, спутников). Из зарегистрированных атмосферно-оптических явлений неожиданную форму проявило зеркальное отражение наземных источников света на облаках из ледяных пластинок.

На серии изображений неба, полученных ночью 8 сентября 2015 г. в интервале с 00:00 до 03:15 (UTC + 6), обнаружили светлые пятна, лучи, прямые и извилистые контуры различной яркости (рис. 1, цв. вкладка) [13]. Интервал фотосъемки составлял ~35 с и экспозиция 30 с (ISO = 2500, $1/f = 4$). Учитывая, что фотосъемка производилась с очень высокой экспозицией, можно предположить, что визуально на небе эти свечения не были видны, и их яркость была лишь немного выше фона неба. На изображении небосвода (рис. 1, цв. вкладка) линия горизонта — по кругу изображения, в центре точка зенита. В восточной стороне небосвода след восходящей Луны, а правее блик от нее. Для упрощения изложения далее в статье наблюдаемые необычные светлые пятна, лучи, прямые и извилистые контуры различной яркости будут называться глифами или световыми глифами, чтобы не смешивать понятие «отражение» как физическое явление и как визуализированный образ того, что отражается. Глиф с греческого γλῶφ — вырезаю, гравировую, вырезанный или начертанный.

Визуальный анализ серии изображений неба показал, что на фоне проходящих облаков глифы исчезали и появлялись вновь, но оставались неподвижными относительно сторон света и высоты над

* Александр Михайлович Морозов (moroza@iao.ru); Виктор Петрович Галилейский (gvp@iao.ru); Алексей Иванович Елизаров; Дмитрий Валериевич Кокарев.

горизонтом. Последний факт позволил путем совместной обработки небольшого ряда фотографий улучшить видимость фрагментов необычного явления, различить новые детали и свести в одну картину (рис. 1). На сводном изображении видны протяженные извилистые пересекающиеся линии и множество радиально расходящихся относительно зенита коротких линий различной яркости, разбросанные по небосводу.

На этот период визуально (по фотографиям) состояние облачности неба следующее: перисто-слоистые облака от 2 до 8 баллов (местами хорошо просматривались звезды в виде светлых коротких дуг), переходящие в конце в плотную перистокучевую облачность. В табл. 1 приведена информация о состоянии облачности неба по данным метеостанции аэропорта Богашево (Томск) [14]. Содержание таблицы соответствует источнику с изъятием некоторых несущественных колонок. По наблюдению авторов и в сводках погоды атмосферных осадков в этот период не отмечалось. Снежного покрова на грунте не было.

Из табл. 1 следует, что в интересующее время отсутствует облачность нижнего и среднего яруса и наблюдались в основном облака верхнего яруса (колонка 6, время 03:00), которые возникают, как правило, на высотах 6–12 км. Облака на таких высотах состоят из кристаллов льда. При определенных температурно-влажностных условиях в облаках образуются гексагональные ледяные пластинки. При оседании под действием силы тяжести ледяные

пластинки в воздушной среде испытывают аэродинамическое выравнивание в горизонтальной плоскости [15], образуя слой горизонтально ориентированных зеркальных пластинок [16–18]. В таких ситуациях создаются условия для появления вблизи ярких источников света вертикальных световых столбов (рис. 2). Пример тому хорошо всем известные световые столбы над фонарями в зимнее время. Авторы статьи при прожекторном зондировании атмосферы [16, 19–22] многократно наблюдали зеркальное отражение света на ориентированных снежинках, как в приземном слое во время снегопада, так и на снежных облаках (рис. 3). Наблюдаемые на изображениях (рис. 1, врезки) в западной стороне неба (над городом) светлые линии (известные как световые столбы) указывают на наличие в облачности горизонтально ориентированных ледяных пластинок. В пользу этого вывода и радиальная ориентация этих линий относительно зенита.

Видимая вертикальная угловая протяженность ζ (рис. 2) световых столбов зависит от высоты нижней и верхней границ слоя ледяных пластинок и от дальности D расположения источника света от наблюдателя. При многократном превышении высоты H над дальностью D (источник в положении S_2 на рис. 2) линия визирования наблюдателя на отражение близка к нормали зеркального слоя, соотношения горизонтальных и вертикальных видимых угловых размеров светового столба сравниваются, в околозенитной области световой столб воспринимается как световое пятно близкое к круговому.

Таблица 1

Состояние облачности неба по данным метеостанции аэропорта Богашево

| Дата Время (UTC + 6) | $T, ^\circ\text{C}$ | Слоисто-кучевые, слоистые, кучевые и кучево-дождевые облака Cl | Высота основания самых низких облаков, м | Высококучевые, высокослоистые и слоисто-дождевые облака Cm | Перистые, перисто-кучевые и перисто-слоистые облака Ch |
|----------------------------|---------------------|--|--|--|---|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 07.09.2015 г. 21:00 | +7,9 | Слоисто-кучевых, слоистых, кучевых или кучево-дождевых облаков нет | 2500 или более, или облаков нет | Высококучевые просвечивающие, расположенные на одном уровне | Перистых, перисто-кучевых или перисто-слоистых облаков нет |
| 08.09.2015 г. 00:00 | +5,9 | — | — | — | — |
| 08.09.2015 г. 03:00 | +4,6 | Слоисто-кучевых, слоистых, кучевых или кучево-дождевых облаков нет | 2500 или более, или облаков нет | Высококучевых, высокослоистых или слоисто-дождевых обла- ков нет | Перистые нитевидные, иногда когтевидные, не распространяющиеся по небу |
| 08.09.2015 г. 06:00 | +4,8 | Слоисто-кучевые, образовавшиеся не из кучевых | 600–1000 | Высококучевые просвечивающие, полосами либо один или несколько слоев высококучевых просве- чивающих, распростра- няющихся по небу; эти высококучевые в целом уплотняются | — |

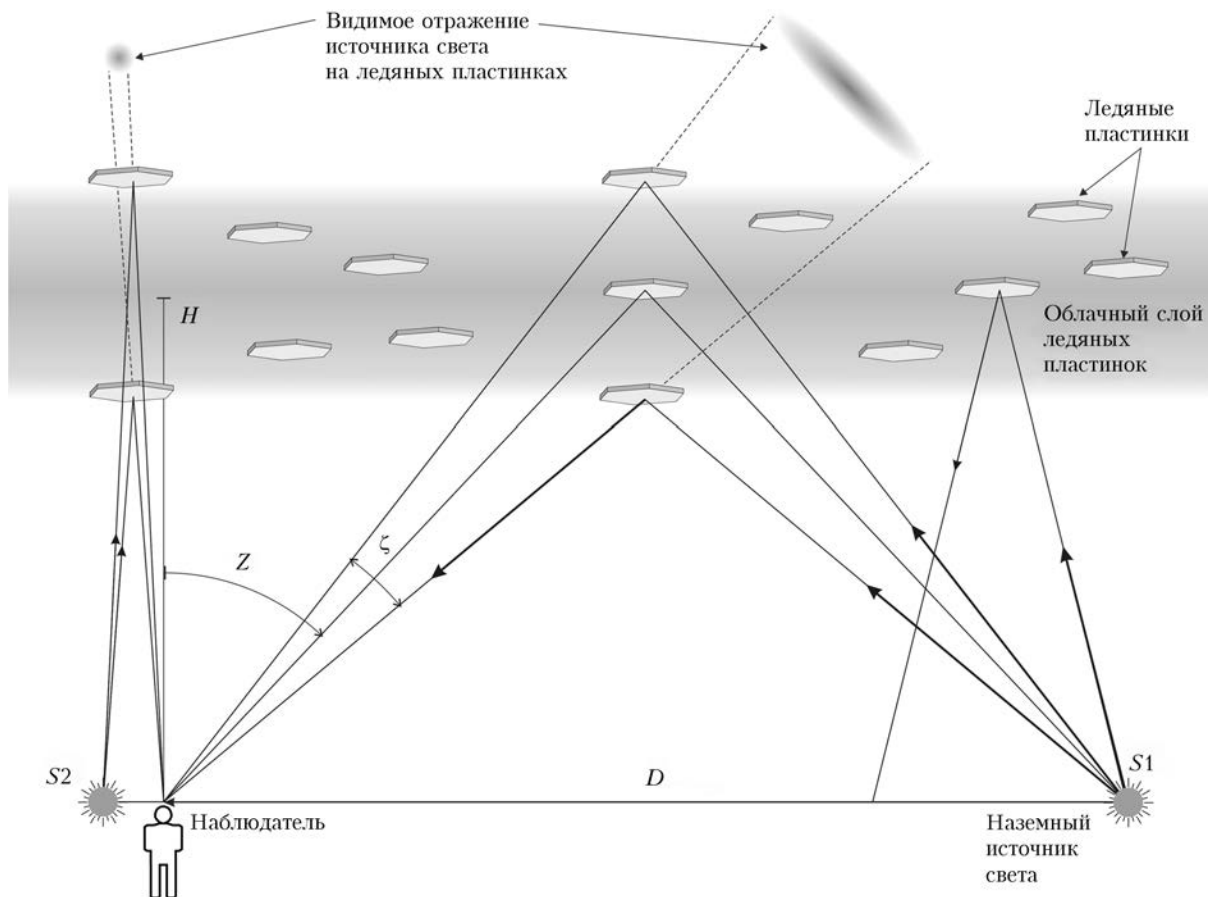


Рис. 2. Схема образования световых столбов от наземных источников света в результате отражения от слоя плоских ледяных кристаллов



Рис. 3. Отражение прожекторного луча на облачном слое из пластинчатых снежинок. Наблюдения авторов [16]

Для интерпретации наблюдаемых в околозенитной области неба световых глифов (рис. 1) их сопоставили с ГИС-картами района (Яндекс Карты, спутниковыми снимками Google Earth и т.п.). В районе расположения станции обнаружилось пересечение улиц (пр. Развития и ул. Юрия Ковалева), очень напоминающее фигуру «4», а затем некоторые другие (рис. 4, цв. вкладка) улицы, расположенные в радиусе несколько километров, контуры которых сопоставимы с линиями на небосводе.

Если верно предположение о зеркальном отражении, то не составляет большой сложности оценить высоту облачности H , вызывающей наблюдаемое отражение. Для этого достаточно определить расстояние D по земной поверхности между местом расположения ПОС и точкой на Земле, соответствующей наблюдаемой в небе, и зенитный угол, под которым отражается свет этого объекта от слоя к наблюдателю. Расстояние D находится по ГИС-картам. Угол отражения является зенитным расстоянием Z , на котором видно отражение на небе. Приблизительно, не учитывая кривизну земной поверхности, расчет производится по формуле

$$H = \frac{D}{2} \operatorname{ctg} Z.$$

На изображении неба (рис. 1) было выбрано семь четко выраженных точек светового глифа

в околозенитной области, которые надежно сопоставляются на плане с инфраструктурой города (табл. 2, рис. 4). Первые четыре точки соответствуют фигуре «4» на небе и пересечению пр. Развития и ул. Юрия Ковалева. По этим семи точкам была произведена оценка высоты отражающего слоя. Средняя высота H зеркального слоя облачности оказалась равной $(4,18 \pm 0,08)$ км. Полученное значение высоты несколько ниже для типа облачности, указанного в метеосводке (табл. 1). Но надо учесть, что тип облачности на метеостанции оценивался в ночное время и возможны ошибки в их идентификации. Полученное значение высоты H было использовано для привязки к местности восьмой точки табл. 2, а также для проецирования пикселей изображения неба на земную поверхность. Рис. 4, б — результат «выпрямления» фрагмента небосвода (рис. 1), при котором восстанавливается однородный масштаб по полю и может быть совмещен с планом города. Расчет показал, что яркий блик на юго-востоке, который изначально привлек внимание к световому феномену, оказался вызван большим тепличным комплексом в селе Трубачево, находящимся на расстоянии 6,15 км от места наблюдения.

Таблица 2

Список некоторых четко выраженных точек светового глифа в околозенитной области, которые надежно сопоставляются на плане с инфраструктурой города

| № точки | Az | Z | D , км | H , км |
|---------|------------|-----------|-------------|-------------|
| 1 | +298°42',7 | +04°17',5 | 0,625 | 4,175 |
| 2 | +242°18',1 | +04°15',6 | 0,611 | 4,110 |
| 3 | +248°34',4 | +06°39',1 | 0,990 | 4,267 |
| 4 | +220°11',9 | +05°32',8 | 0,828 | 4,279 |
| 5 | +130°49',3 | +06°01',7 | 0,862 | 4,101 |
| 6 | +90°21',2 | +13°25',7 | 1,981 | 4,229 |
| 7 | +102°51',9 | +13°44',9 | 1,960 | 4,086 |
| 8 | +331°37',9 | +37°10',2 | 6,15 | 4,18 |

Видимая угловая протяженность светового столба может быть использована для оценки вертикальной протяженности слоя отражающей облачности, если известна дальность до соответствующего источника света или средняя высота облачности. Оценка, сделанная по световому столбу на юго-востоке, показала, что вертикальная протяженность оказалась равной ~300 м.

Обсуждаемое наблюдение зеркального отражения на ледяных облаках было не единственным. За период с сентября 2015 по май 2016 г. было отмечено около 30 случаев подобных явлений, не считая рядовых «световых столбов» над фонарями. По сезонам число наблюдений глифов: осенью — 1, зимой — 21, весной — 8 случаев. На рис. 5 (цв. вкладка) приводится еще один случай наблюдения светового глифа, возникшего 22 декабря 2015 г. в 19:14. Случай примечателен тем, что зеркальный слой находился на высоте всего ~270 м и наблюдались отражения отдельных фонарей. Возможно, реальных случаев было несколько больше, но в полнолуние значи-

тельно ухудшаются условия наблюдения из-за значительного фона.

Наиболее выразительным индикатором появления в атмосфере зеркального слоя оказалось наличие в небе глифа в виде «4», связанного с известными элементами инфраструктуры района города. Наблюдая во времени за положением на небе и размерами этой фигуры, можно судить о поведении облачного слоя. Зарегистрированы случаи раздвоения контура вследствие наличия двойного зеркального слоя; смещение глифа во времени относительно зенита указывало об изменении высоты облачности.

Непосредственно после обнаружения описанного в статье феномена авторы провели литературный поиск с целью найти упоминания о подобных явлениях. Результат был нулевой. В большинстве случаев в статьях рассматривались явления световых столбов, возникающие от фонарей над землей или высоко в небе, подобные приведенным на рис. 3. Позже вышла статья Mia Heikkilä (Eura, Finland) [23] от 12 января 2016 г., опубликованная на сайте <http://spaceweathergallery.com>, в которой сообщается о наблюдении в небе световых столбов и световой карты местности и приводятся фотографии и карта местности.

Проведенный анализ и обработка изображений позволяют сделать вывод, что наблюдаемые в небе световые глифы — результат хорошо известного природного явления, вызванного зеркальным отражением света наземных источников слоем горизонтально ориентированных гексагональных ледяных кристаллов в атмосфере. При значительном превышении зеркальной компоненты рассеяния над диффузным рассеянием на ледяных кристаллах возникает имитация пространственно-распределенного, как по горизонту, так и по высоте, зеркала, в котором отражается освещаемая городская инфраструктура, дорожная сеть и отдельные источники света.

Описанный в этой статье оптический феномен, как и другие атмосферно-оптические явления (венцы, гало, радуги и т.п.), является индикатором для диагностики оптического состояния и аэрозольного состава атмосферы, для которой могут быть использованы как естественные, так и искусственные источники света. Как отмечалось выше, при зеркальном отражении света источника, положение которого известно, возможно оценить высоту отражающего слоя; угловая горизонтальная и вертикальная протяженность светового столба позволяет оценить дисперсию ориентации ледяных пластинок и протяженность слоя зеркальной облачности по высоте. Панорамно-оптическая станция предоставляет широкие возможности в плане наблюдения, регистрации оптического состояния неба и оценок его состояния.

1. Галилейский В.П., Морозов А.М. Панорамный фотометрический комплекс // Оптика атмосф. и океана. 1993. Т. 6, № 9. С. 1131–1135.
2. Галилейский В.П., Морозов А.М., Ошлаков В.К. Панорамный фотометрический комплекс для контроля прямой и рассеянной солнечной радиации // Региональный

- мониторинг атмосферы. Ч. 2. Новые приборы и методики измерений: монография / Под общ. ред. М.В. Кабанова. Томск: Изд-во «Спектр» ИОА СО РАН, 1997. С. 146–160.
3. Галилейский В.П., Зуев К.Г., Колеватов А.С., Морозов А.М., Петров А.И. Комплекс измерений астроклиматических и метеорологических параметров // XVII Междунар. симп. «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы». Сб. трудов [Электронный ресурс]. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2011. С. С316–С319.
 4. Галилейский В.П., Елизаров А.И., Кокарев Д.В., Морозов А.М. Метод устранения дисторсии в allsky-изображениях при обработке данных // XXII Рабочая группа «Аэрозоли Сибири». Томск, 24–27 ноября 2015. С. 70.
 5. Галилейский В.П., Гришин А.И., Морозов А.М. Пассивный моностабильный метод оценки высоты и скорости движения облачности по наблюдениям с земной поверхности // XVIII Рабочая группа «Аэрозоли Сибири». Тезисы докладов. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2011. С. 77.
 6. Галилейский В.П., Елизаров А.И., Кокарев Д.В., Морозов А.М. Алгоритм определения облачности по allsky-изображениям ночного неба // XXII Рабочая группа «Аэрозоли Сибири». Томск, 24–27 ноября 2015. С. 71.
 7. Галилейский В.П., Елизаров А.И., Кокарев Д.В., Морозов А.М. Программно-техническая система мониторинга облачности и контроля оптико-физического состояния атмосферы, на базе панорамной фотометрической системы «All SKY» // XXII Рабочая группа «Аэрозоли Сибири». Томск, 24–27 ноября 2015. С. 72.
 8. Галилейский В.П., Елизаров А.И., Кокарев Д.В., Морозов А.М. Предварительные результаты наблюдений полярных сияний с использованием панорамно-оптической станции TomSky // XXII Рабочая группа «Аэрозоли Сибири». Томск, 24–27 ноября 2015. С. 72.
 9. Галилейский В.П., Елизаров А.И., Кокарев Д.В., Морозов А.М. Хранение и обработка фотометрических данных системы мониторинга AllSky // XXII Рабочая группа «Аэрозоли Сибири». Томск, 24–27 ноября 2015. С. 73.
 10. Elizarov A.I., Galileiskii V.P., Kokarev D.V., Morozov A.M. Cloud elements detection on the panoramic image of the sky // Proc. SPIE. 2015. V. 9680. DOI: 10.1117/12.2205321.
 11. Галилейский В.П., Елизаров А.И., Кокарев Д.В., Морозов А.М. Использование панорамных изображений неба для расчета вектора состояния облачности // Международный научно-исследовательский журнал. Сборник по результатам XXXII заочной научной конференции Research Journal of International Studies. Екатеринбург. 2014. № 10(29). Ч. 2. С. В22–В24.
 12. Галилейский В.П., Елизаров А.И., Кокарев Д.В., Морозов А.М. Определение направления и угловой скорости перемещения облачности с помощью панорамных изображений неба // Оптика атмосфер. и океана. Физика атмосферы: Сборник докладов XX Междунар. симп. [Электронный ресурс – 1 CD-ROM]. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2014. С. В82–В85.
 13. Галилейский В.П., Елизаров А.И., Кокарев Д.В., Морозов А.М. Наблюдение аномального оптического явления над городом // XXII Рабочая группа «Аэрозоли Сибири». Томск, 24–27 ноября 2015. С. 71.
 14. URL: http://gr5.ru/Архив_погоды_в_Томске
 15. Волковицкий О.А., Павлова Л.Н., Петрушин А.Г. Оптические свойства кристаллических облаков. Л.: Гидрометеониздат, 1984. 198 с.
 16. Галилейский В.П., Гришин А.И., Морозов А.М., Ошлаков В.К. Зеркальное отражение от атмосферных неферрических частиц // Оптика атмосфер. и океана. 1994. Т. 7, № 9. С. 1301–1305.
 17. Галилейский В.П., Кауль Б.В., Матвиенко Г.Г., Морозов А.М. Угловая структура интенсивности света вблизи углов зеркального отражения от граней кристаллических частиц льда // Оптика атмосфер. и океана. 2009. Т. 22, № 7. С. 643–649; Galileyskii V.P., Kaul B.V., Matvienko G.G., Morozov A.M. Angular structure of the light intensity near the angles of mirror reflection from faces of ice crystalline particles // Atmos. Ocean. Opt. 2009. V. 22, N 5. P. 506–512.
 18. Маричев В.Н., Галилейский В.П., Кузьменков Д.О., Морозов А.М. Экспериментальные наблюдения зеркального отражения лазерного излучения от ориентированных кристаллических частиц, сосредоточенных в слое атмосферы // Оптика атмосфер. и океана. 2009. Т. 22, № 12. С. 1145–1147; Marichev V.N., Galileyskii V.P., Kuz'menkov D.O., Morozov A.M. Experimental observation of the mirror reflection of laser radiation from oriented particles concentrated in the atmospheric layer // Atmos. Ocean. Opt. 2010. V. 23, N 2. P. 132–136.
 19. Вагин Н.И., Галилейский В.П., Морозов А.М. Оценка размеров ледяных пластинок создающих зеркально отражающие слои // XVIII Рабочая группа «Аэрозоли Сибири». Тезисы докладов. Томск, 2011. С. 11.
 20. Галилейский В.П., Боровой А.Г., Матвиенко Г.Г., Морозов А.М. Зеркально отраженная компонента при рассеянии света на ледяных кристаллах с преимущественной ориентацией // Оптика атмосфер. и океана. 2008. Т. 21, № 9. С. 773–778.
 21. Borovoi A., Galileiski V., Morozov A., Cohen A. Detection of ice crystal particles preferably oriented in the atmosphere by use of the specular component of scattered light // Opt. Express. 2008. V. 16, N 11. P. 7625–7633.
 22. Кауль Б.В., Самохвалов И.В. Ориентация частиц кристаллических облаков Ci: Часть 1. Ориентация при падении // Оптика атмосфер. и океана. 2005. Т. 18, № 11. С. 963–967.
 23. Mia Heikkilä. Light Pillars – Light Map In The Sky. Kauttua, Eura, Finland. URL: http://spaceweathergallery.com/indiv_upload.php?upload_id=121829

A.M. Morozov, V.P. Galileiskii, A.I. Elizarov, D.V. Kokarev. Observation of the mirror reflection of lighted underlying surface by a cloudy layer of ice plates.

The observation of specular reflection of illuminated underlying surface cloud layer of horizontally oriented ice plates is reported. The conditions and means of observing this phenomenon are described. Certain evaluations of the characteristics of the reflecting layer clouds obtained on the basis of these observations, are presented as well as photographs, illustrating the phenomenon.

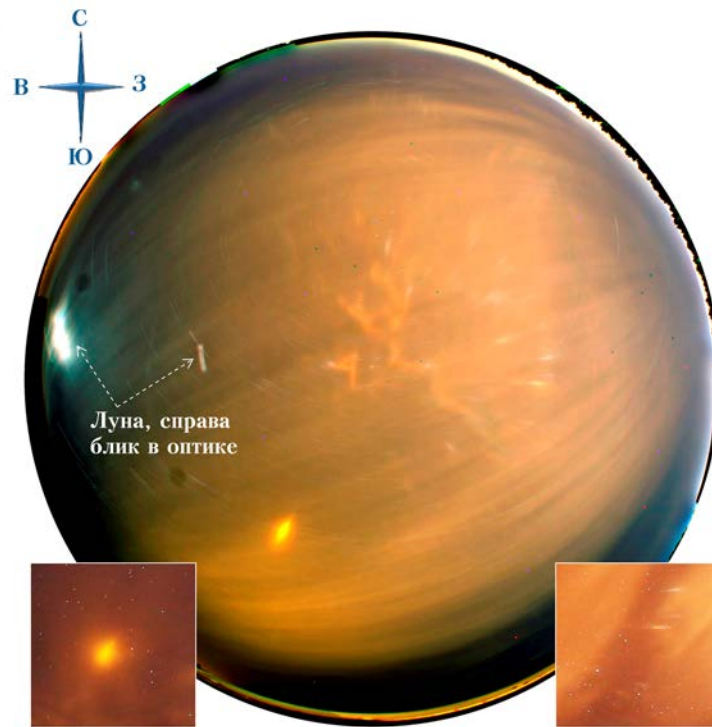


Рис. 1. Изображение небосвода с отражениями городского освещения на слое облачности из ледяных пластинок. Точка зенита в центре круга; линия горизонта по границе изображения неба. Яркое пятно у восточного горизонта (слева) восходящая Луна и ее блик в объективе. На врезках световые столбы над отдельными яркими наземными источниками света

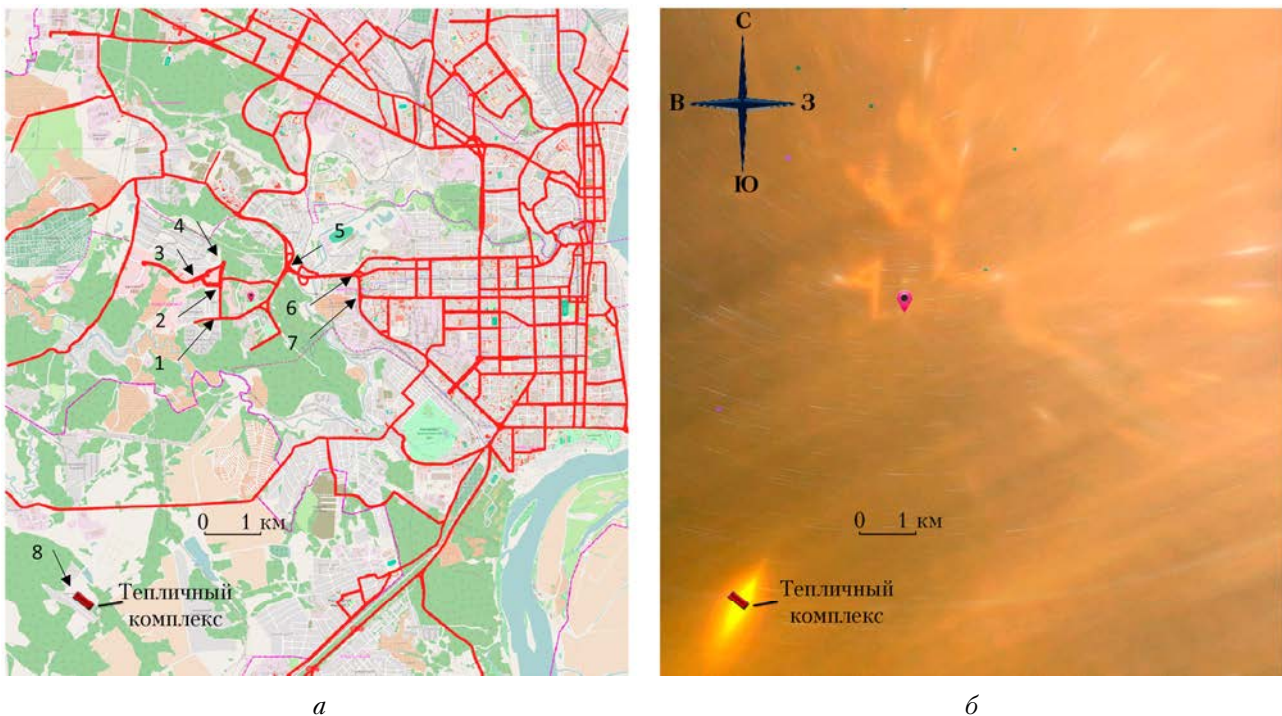



Рис. 4. Сопоставление карты (а) города с отражением на облаках (б). На карте красным отмечены городские улицы; б – фрагмент изображения участка неба (рис. 1) в проекции на план города. Север – вверху, запад – справа. Цифрами отмечены узловые точки из табл. 2. Символом  отмечено место расположения станции наблюдения

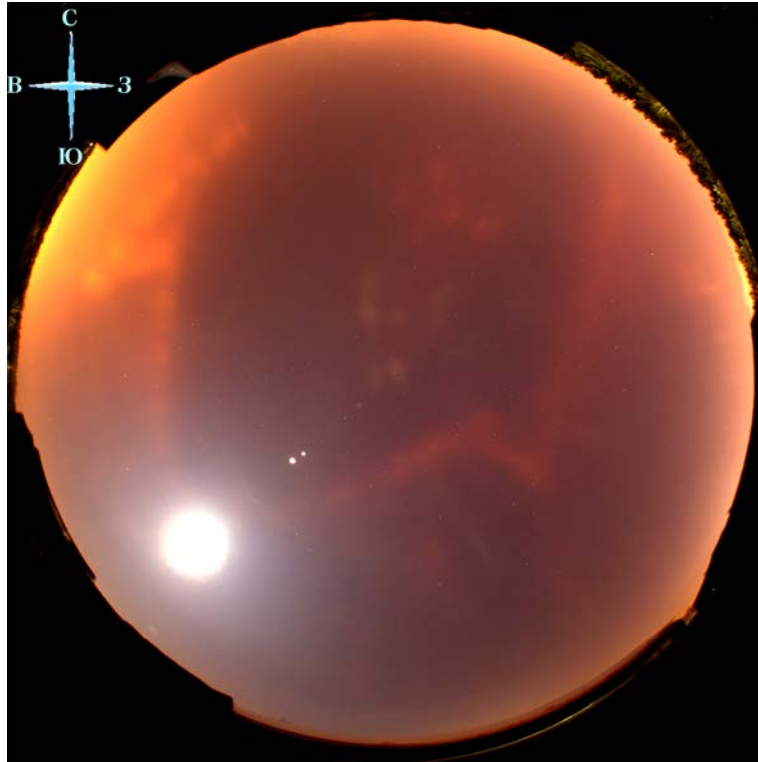


Рис. 5. Фотография отражения на небосводе освещенной городской инфраструктуры вокруг ПОС в радиусе около 1300 м. Получено 22 декабря 2015 г. в 19:14. Можно видеть отражения тех же элементов, что и на карте города рис. 4, а, но на больших зенитных углах, что соответствует высоте отражающего слоя 270 м. Большое белое пятно – ореол Луны