

Некоторые результаты мониторинга морского горизонта в красной и ближней инфракрасной областях спектра

И.А. Маслов^{1,2}, В.А. Гришин¹

¹*Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия*

E-mail: imaslov@iki.rssi.ru

²*Московский Государственный университет, Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга, Москва, 119991, Россия*

E-mail: IRLab@yandex.ru

Повышение требований к надежности навигации летательных аппаратов, особенно в условиях возможного противодействия, требует расширения источников навигационной информации и их эффективного комплексирования. Одним из таких источников является наблюдение линии горизонта, результаты которого могут использоваться как для определения местной вертикали, так и непосредственно для корреляционно-экстремальной навигации. Проблемой является то, что наличие плотной атмосферы Земли существенно затрудняет наблюдение линии горизонта при больших длинах оптических трасс (десятки и сотни км). В связи с этим проведено экспериментальное исследование возможности наблюдения линии горизонта над морской поверхностью в спектральной области 550–1000 нм. Полученные данные указывают на возможность наблюдения распределения яркости вблизи горизонта даже в ночное безлунное время. По звездам была оценена величина коэффициента пропускания атмосферы вблизи горизонта. Для этого была проверена и подтверждена возможность использования для оценки потока излучения, приходящего от звезды в спектральной области 550–1000 нм, ее звездной величины в видимой области спектра. При этом предполагалось, что распределение энергии в ее спектре соответствует излучению абсолютно черного тела с температурой, определяемой по спектральному классу звезды. Градиент увеличения пропускания атмосферы при увеличении угла над горизонтом находился в пределах от 0,1 до 0,3 градус⁻¹. Полученные экспериментальные результаты предполагается использовать для сравнения с результатами численного расчета линии горизонта и коэффициента пропускания атмосферы.

Ключевые слова: навигация, мониторинг, линия горизонта, море, атмосфера, звезды

Введение

В настоящее время наблюдается значительная активизация исследований, связанных с развитием методов навигации, обладающих повышенной устойчивостью и надежностью в условиях возможного противодействия. Указанная цель достигается за счет расширения числа источников навигационной информации и их комплексирования. Одним из возможных направлений решения этой задачи является использование наблюдаемой линии горизонта как для определения направления местной вертикали, что необходимо для навигации по изображению звездного неба, так и непосредственно для корреляционно-экстремальной навигации.

Проблема заключается в том, что, в отличие от Марса и Луны, решение навигационной задачи по наблюдению линии горизонта на Земле существенно осложняется наличием плотной атмосферы, не говоря уж об облачности.

На протяжении многих десятилетий активно проводятся исследования свойств атмосферы. При этом используются спутниковые (Kaiser et al., 2004), авиационные и наземные методы (Угольников, Маслов, 2002), (Розенбуш, Видьмаченко, 2011), в том

числе используя наблюдения лунных затмений (Ugolnikov, Maslov, 2008). На основе очень большого количества экспериментальных данных разрабатываются различные программы, позволяющие производить расчеты распространения излучения в атмосфере, в частности MODTRAN, MOSART и др. Различные авторы производят верификацию результатов расчетов, выполненных подобными программами, см. например (Carr, 2005).

Особенно такая верификация необходима при расчетах, связанных с возможностью наблюдения линии горизонта для разных высот (Маслов, Гришин, 2013). Дело в том, что при наблюдении линии горизонта оптические трассы получаются очень протяженными, а затухание весьма большим даже в окнах прозрачности атмосферы. Поэтому контраст между областями изображения, соответствующими небу и земле (океану), получается очень малым – единицы процентов и менее. Более того, в этих условиях требуется, чтобы точность расчета программами была лучше указанных величин, что является весьма жесткими требованиями. Подобную верификацию лучше всего было бы осуществить на установках, сходных с Whole Sky Imager (WSI), в которых составной частью является The Horizon Scanning Imager (HSI) (Shields, 1992). Однако такой проект слишком дорог. В наших силах провести сравнение экспериментальных и расчетных данных по затуханию в атмосфере, используя в качестве источников для просвечивания атмосферы звезды, сравнить расчетные и экспериментальные оценки контраста небо/земля и получить некоторые приближенные оценки по рефракции (ее стабильности и величине). В данной статье мы публикуем наши экспериментальные данные. Подробный анализ результатов и подбор оптических параметров атмосферы для приведения результатов расчетов в соответствие с наблюдениями предполагается осветить позднее.

Аппаратура

Для экспериментальной оценки влияния этих факторов нами были проведены круглосуточные наблюдения горизонта над Черным морем в районе п. Симеиз (Крым). Координаты точки съемки: $44^{\circ}25'$ с. ш, $33^{\circ}59'$ в. д. Высота точки съемки – 370 м. Съемка производилась с использованием ПЗС камеры Meade DSI Pro SONY ExView HAD™ Monochrome CCD 510x492 и объектива Мир-20 (F20 мм, 1:3,5) через узкополосные светофильтры 770, 867 и 938 нм, а также через широкополосный светофильтр с коротковолновой границей 550 нм (*рис. 1*). В данной работе описываются результаты исследований с широкополосным светофильтром. Поле зрения камеры составляло порядка 12 градусов. Камера при съемке устанавливалась неподвижно. Экспозиция составляла от 0,0001 сек днем до 15 сек ночью. Для определения положения «астрономического» горизонта и фотометрической калибровки использовались изображения звезд. Для оценки сигнала от звезды и уровня фона использовались: содержащий изображение звезды квадрат 9×9 пикселей и окружающий его периметр квадрат с внешним размером 13×13 пикселей.

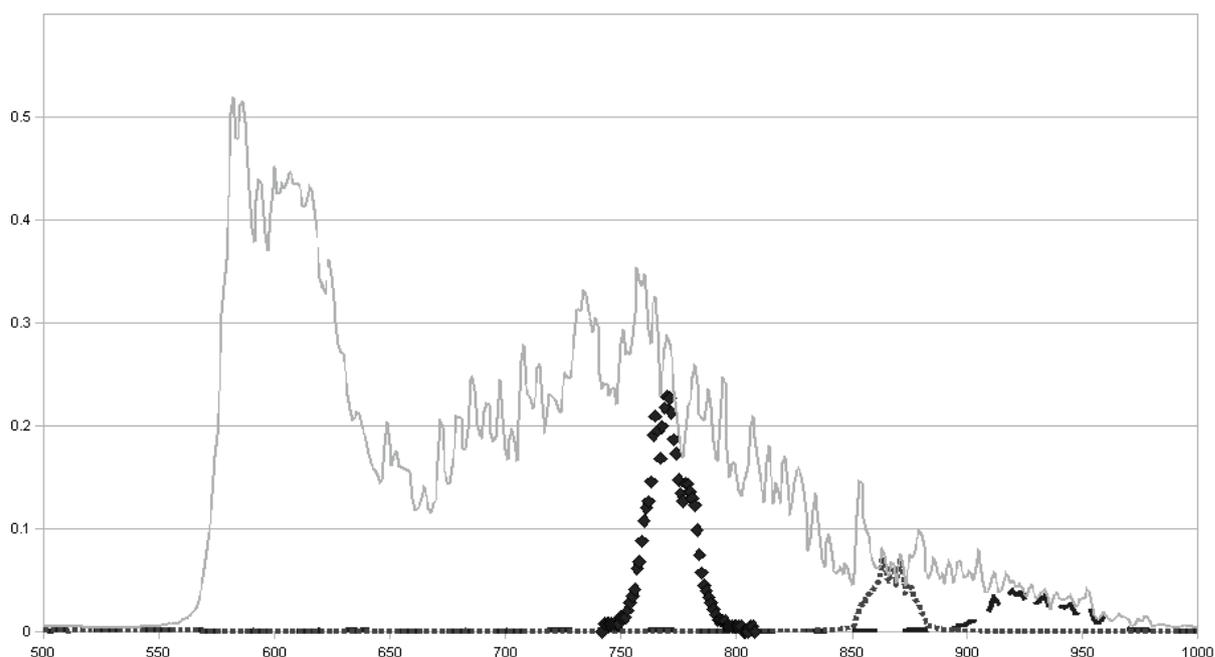


Рис. 1. Спектральные полосы, в которых производились измерения. Учтены спектральная чувствительность фотоприемника и пропускание светофильтров: 770 нм (ромб), 867 нм (точка), 938 нм (штрих), широкополосный красный (непрерывная линия). По горизонтальной оси отложена длина волны в нанометрах, по вертикальной оси – рассчитанная светочувствительность в относительных единицах

Фотометрическая калибровка

Существуют надежные, хорошо отработанные методики калибровки по набору звезд, являющихся спектрофотометрическими стандартами. Однако целью данной статьи является проведение относительных и оценочных абсолютных измерений – контраста, переменности и градиента пропускания атмосферы как функции зенитного расстояния. Исходя из удобства, с точки зрения единства методики обработки результатов, калибровка аппаратуры (табл. 1) была выполнена по случайно выбираемым звездам вблизи зенита, аналогично тому, как мы были вынуждены делать при измерении звезд

Таблица 1. Результаты калибровки аппаратуры с широкополосным светофильтром

Звезда SAO	Спектральный класс	Звездная величина, полоса V	Температура, К	Калибровка, ед.АЦП/фотон*
101429	M4III	5,9	2900	3,495
101545	M1III	5,17	3350	3,194
101682	A1V	4,5	9750	3,198
101725	A1V	3,7	9750	2,467
101623	F0IV	5,1	7500	2,965
101640	K0III	5,3	5000	3,488

* В предположении спектральной чувствительности, соответствующей рис. 1.

вблизи горизонта. Поскольку при проведении калибровки мы не измеряли прозрачность атмосферы, а принимали ее равной 80%, что является типичным для хороших условий наблюдения в используемом спектральном диапазоне, то неопределенность в реальной прозрачности атмосферы может приводить к некоторой ошибке в абсолютных значениях потоков.

Звездные величины в стандартной астрономической полосе V и спектральные классы звезд брались из каталога звездной спектральной классификации (Skiff, 2009–2014). Звездная величина определяет квантовый поток вблизи 550 нм, а спектральный класс отражает распределение энергии по спектру (температуре). По этим данным мы откалибровали аппаратуру и использовали эту калибровку для оценки пропускания атмосферы по звездам, находящимся вблизи горизонта. Недостаток этого метода заключается в том, что звезды не являются абсолютно черными телами и некоторые из них окружены пылевыми оболочками, дающими избыток излучения в инфракрасной области спектра, к которому чувствительна наша аппаратура. Кроме того, многие звезды являются переменными. Однако получение достаточно близких калибровок для звезд с разной температурой указывают на возможность использования такой методики. Следует отметить, что дополнительная калибровка камеры по сфере Ульбрихта дала значение калибровочного коэффициента, равное 3,2, что достаточно близко к полученным оценкам по звездам.

Мониторинг яркости атмосферы

На *рис. 2* для примера показан один из кадров, полученных в ночное безлунное время, а на *рис. 3* – вертикальный профиль яркости, который показывает возможность использования этих снимков для анализа распределения света вблизи линии горизонта ночью. Примеры вариаций яркости для направления на юг при зенитном угле 90° приведены для ночного времени на *рис. 4* и для дневного времени на *рис. 5*. Большие пульсации яркости по времени на *рис. 5*, вероятно, вызваны нестационарностью атмосферного аэрозоля, особенно влияющего на яркость неба вблизи горизонта.

Таким образом, для ночного времени, при отсутствии освещения со стороны Луны, необходимо учитывать наличие звезд, которые достаточно хорошо освещают поверхность Земли для того, чтобы иметь возможность наблюдать распределение яркости вблизи горизонта. Учитывая, что наблюдения велись с высоты 370 м, авторы считают, что наблюдаемое распределение яркости моря ночью (*рис. 2* и *3*) обусловлено подсветкой от звездного неба. Хотя априорно нельзя исключить и вклада источников света, находящихся на берегу. Данный вопрос нуждается в дальнейшем исследовании. Чувствительность камеры при выдержке 15 сек достаточно высокая. Для глаза море, корабли на море (видимые на снимке) и звезды, которые использовались для определения прозрачности атмосферы, не видны.

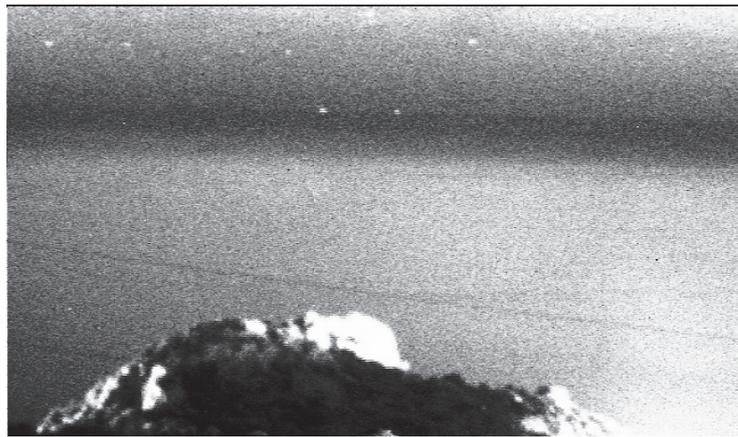


Рис. 2. Ночное изображение, полученное через широкополосный светофильтр с экспозицией 15 секунд. Внизу – близлежащая скала, над ней электропровод, на горизонте – два корабля (невидимые невооруженным глазом), выше – звездное небо вблизи Млечного пути

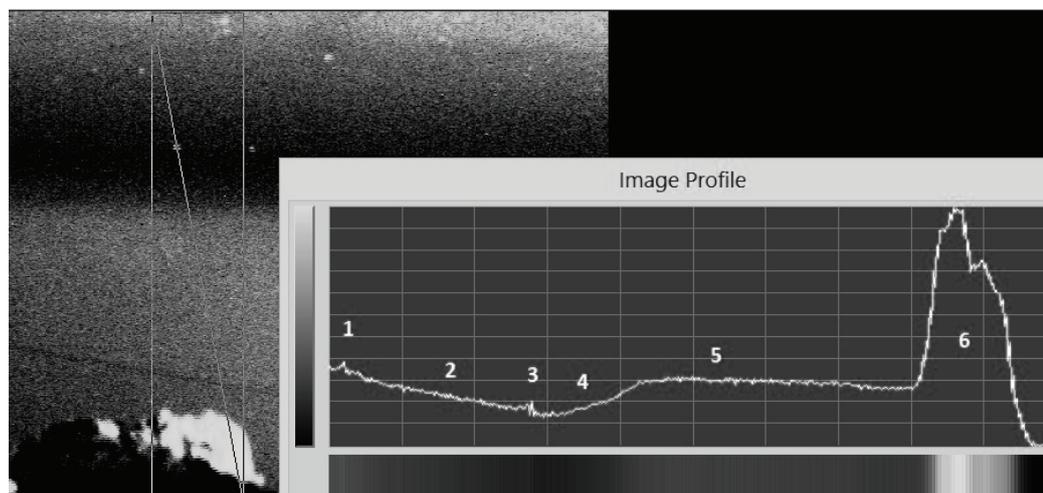


Рис. 3. Вертикальный профиль яркости (сверху-вниз) через один из кораблей, видимых вблизи горизонта. 1 – звезды в Млечном пути; 2 – небо; 3 – корабль на горизонте; 4 – темная часть моря; 5 – светлая часть моря; 6 – скала. Вертикальные линии на изображении ограничивают область, по которой проводилось усреднение сигнала

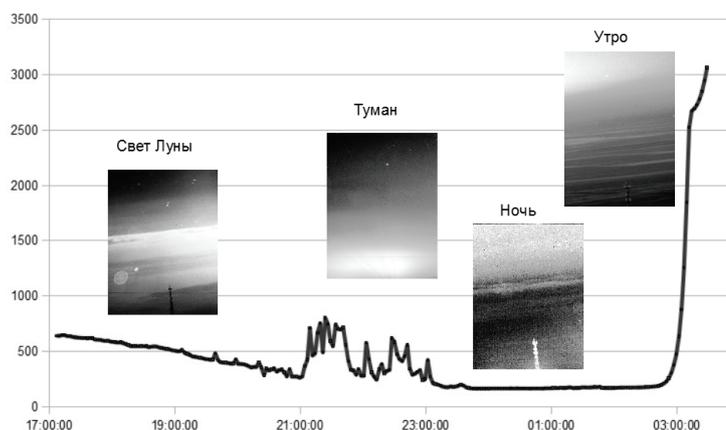


Рис. 4. Яркость неба ночью 12-13 октября 2013 г. в направлении на юг для зенитного расстояния 90° . По оси абсцисс отложено всемирное время, по оси ординат поток в единицах – $\text{фотон} \times \text{сек}^{-1} \times \text{см}^{-2} \times \text{угл.мин}^{-2}$. Над кривой кадры для соответствующего времени. Хорошо заметны пульсации яркости, вызванные туманом с 21 до 23 часов

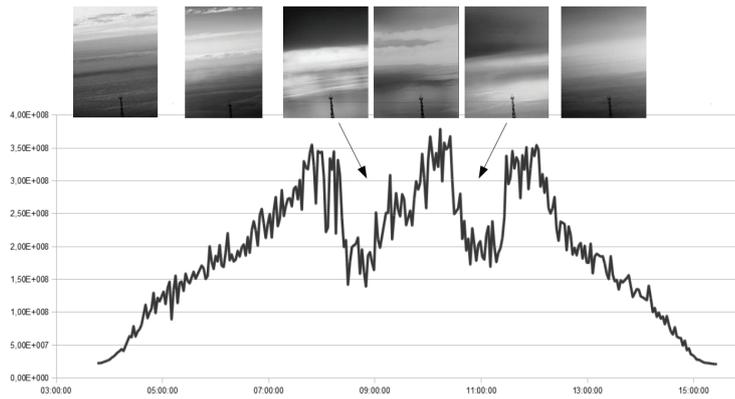


Рис. 5. Яркость неба 12 октября 2013 г. в направлении на юг для зенитного расстояния 90° . По оси абсцисс отложено всемирное время, по оси ординат поток в единицах – фотон $\times \text{сек}^{-1} \times \text{см}^{-2} \times \text{угл. мин}^{-2}$. Вверху представлены кадры для соответствующего времени

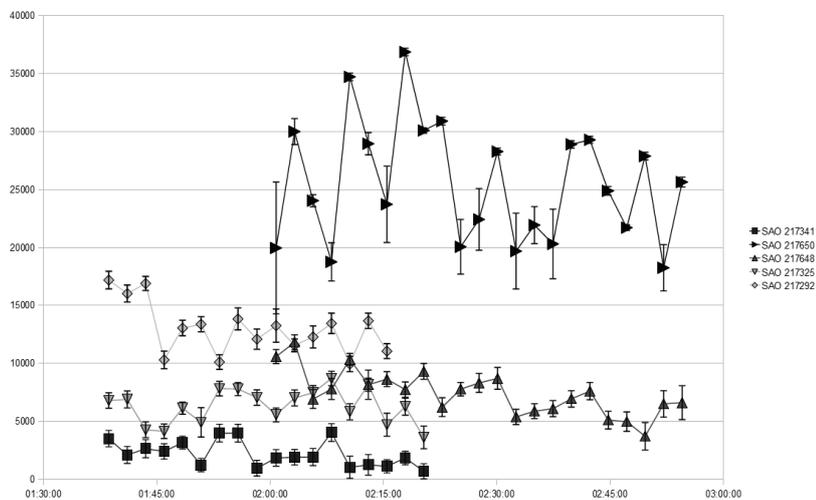


Рис. 6. Зависимость яркости (ед. АЦП) нескольких звезд над горизонтом от всемирного времени ночью 12-13 октября 2013 г. Вертикальные линии соответствуют оценке среднеквадратической ошибки одного измерения

Определение пропускания атмосферы по звездам

Имея в наличии абсолютную калибровку аппаратуры, можно по снимкам определить пропускание атмосферы в направлении на имеющиеся на кадрах звезды. В октябре 2013 г. камера была ориентирована на юг, и звезды в поле зрения передвигались практически параллельно горизонту. На рис. 6 нанесены потоки (или отсчеты) от звезд в единицах АЦП и соответствующие среднеквадратические ошибки измерений в зависимости от времени, а на рис. 7 вычисленное по этим звездам пропускание атмосферы в зависимости от зенитного расстояния.

Отметим, что звезда SAO217292 является долгопериодической переменной (спасибо за замечание, сделанное рецензентом) и, возможно, что именно с этим связано несколько более высокое положение на рис. 7 значений пропускания атмосферы, определенных по ее яркости.

В июне 2014 г. камера была несколько развернута от направления на юг в сторону востока, что позволило наблюдать восход звезд над горизонтом. Поэтому появилась возможность

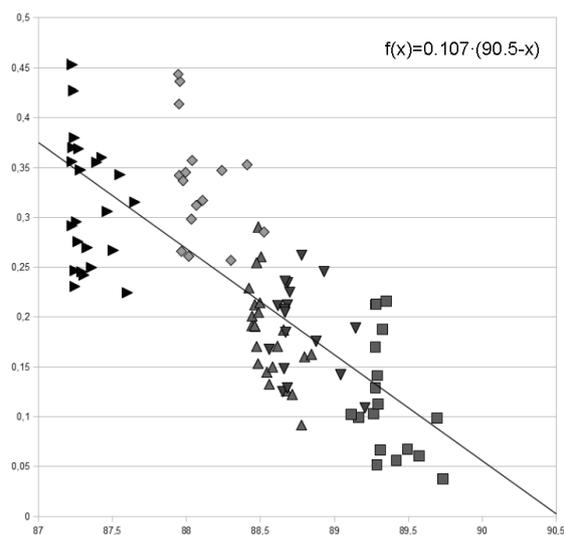


Рис. 7. Величина пропускания атмосферы Земли в зависимости от зенитного расстояния звезд (без учета рефракции) по измерениям ночью 12-13 октября 2013 г. Значки для звезд, те же, что и на рис. 6

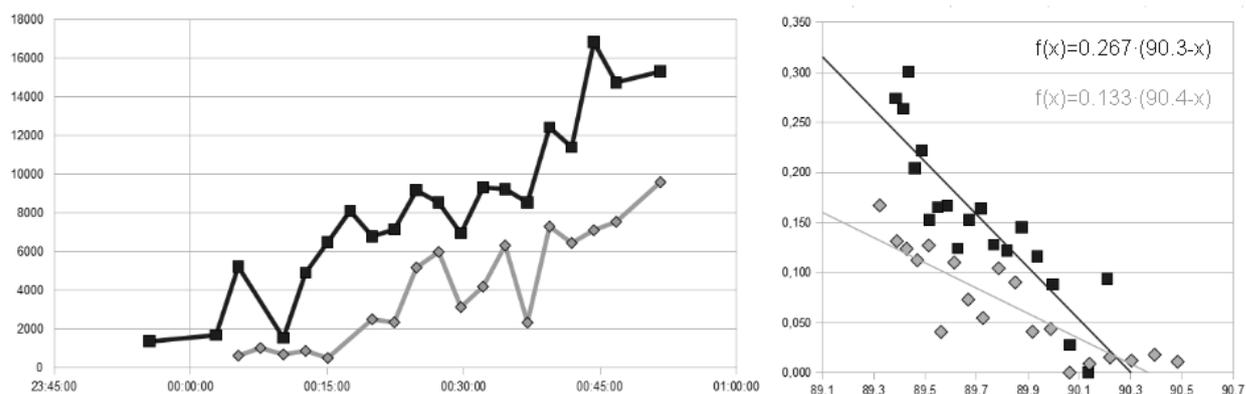


Рис. 8. Слева представлена зависимость яркости (ед. АЦП) звезд SAO230635 (квадрат) и SAO230737 (ромб) в зависимости от всемирного времени ночью 22-23 июня 2014 г. Справа для них же представлена величина пропускания в атмосфере в зависимости от зенитного расстояния в градусах

определять зависимость пропускания атмосферы от зенитного угла по измерениям одной звезды (рис. 8). Коэффициенты роста пропускания с уменьшением зенитного угла ($0,133$ и $0,267$ градус $^{-1}$) получились этим методом, несколько большими, чем в октябре 2013 г. (рис. 7, $0,107$ градус $^{-1}$), но все значения укладываются в интервал от $0,1$ до $0,3$ градус $^{-1}$. Величина пропускания атмосферы вблизи горизонта получилась большой, что свидетельствует об очень чистом воздухе над морской поверхностью и подтверждается астрономическими наблюдениями в этом же месте (Розенбуш, Видьмаченко, 2011). Возможно, с этим связана и полученная нами низкая яркость дневного неба. Необходимо отметить, что расчет пропускания атмосферы программой MODTRAN дает заниженные результаты, что проистекает из использования меньшего значения пропускания атмосферы, которое значительно меняется в разных местах на Земле.

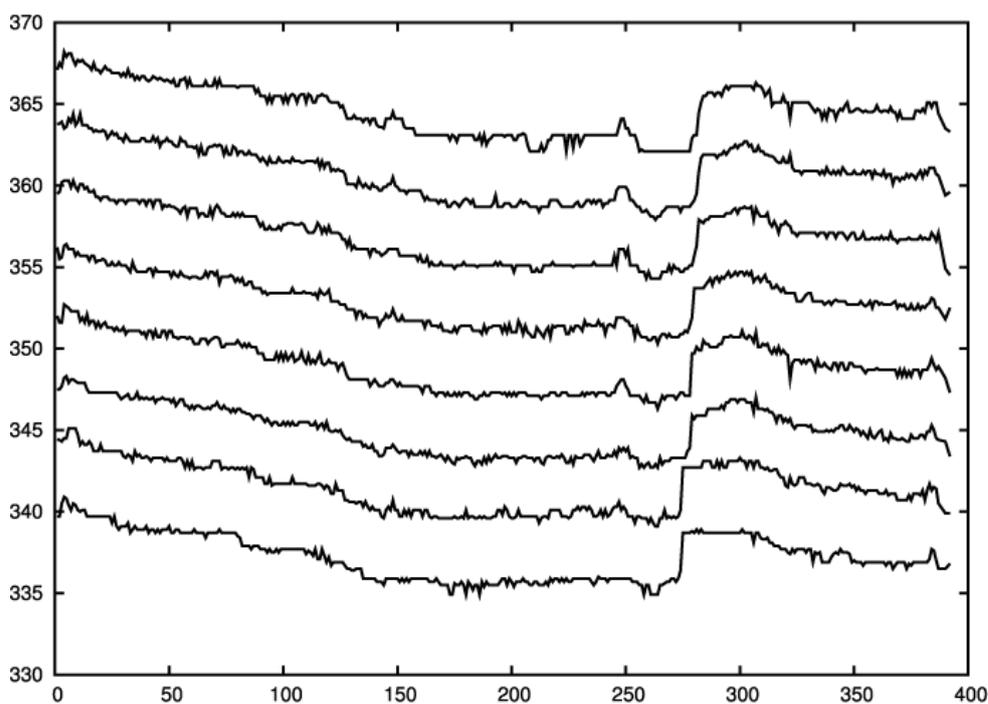


Рис. 9. Положение линии горизонта на снимках, полученных днем 9 мая 2013 г. для восьми направлений в поле зрения. По оси абсцисс отложен номер снимка, по оси ординат - вертикальная координата линии горизонта в пикселях. Поскольку камера развернута относительно оптической оси на некоторый угол, графики имеют сдвиг по оси ординат друг относительно друга

Результаты съемки предполагается использовать для исследования возможности экспериментального определения положения горизонта по снимкам. Пример такого определения положения горизонта в дневных условиях представлен на *рис. 9*, на котором заметны как случайные колебания, так и общий тренд изменения положения линии горизонта за время съемки. Поскольку реальный горизонт для больших расстояний по снимкам не удастся надежно определить, определяем условный горизонт как геометрическое место точек, в которых достигается максимальное значение градиента яркости в вертикальном направлении. Вертикальный сдвиг линии горизонта (условного горизонта) на графике находится в пределах 7 угловых минут. Методы определения условного горизонта в ночных условиях требуют дополнительных расчетных и экспериментальных исследований.

Заключение

Полученные данные указывают на возможность наблюдения распределения яркости вблизи горизонта в области спектра 550–1000 нм даже в ночное безлунное время. Указанный результат является в достаточной мере неожиданным. Проведенное сравнение с ранее сделанными расчетами указывает на необходимость учета для ночного времени света Луны, а при ее отсутствии – и звездного неба, освещающего земную поверхность.

Градиент коэффициента пропускания атмосферы в районе горизонта достаточно велик и характеризуется величиной порядка от 0,1 до 0,3 градус⁻¹.

Работа проводилась при поддержке грантом РФФИ 12-08-00863-а.

Литература

1. Маслов И.А., Гришин В.А. Выбор оптимального спектрального диапазона для наблюдения горизонта Земли // Техническое зрение. 2013. № 1. С. 2-4. URL: http://magazine.technicalvision.ru/publicftp/issue_1%281%29/%D0%A2%D0%B5%D1%85.%D0%B7%D1%80%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B5_1.pdf.
2. Розенбуш А.Э., Видьмаченко А.П. Некоторые характеристики астроклимата на горе Кошка, Симеиз. Кинематика и физика небесных тел. 2011. Т. 27. № 6. С. 72-76.
3. Угольников О.С., Маслов И.А. Многоцветная поляриметрия сумеречного неба. Роль многократного рассеяния света как функция длины волны // Космические исследования. 2002. Т. 40. № 3. С. 242-251.
4. Carr S. B. The Aerosol Models in MODTRAN: Incorporating Selected Measurements from Northern Australia. Edinburgh South Australia: DSTO Defence Science and Technology Organisation. 2005. 67 p. URL: <http://pandora.nla.gov.au/pan/24592/20060223-0000/DSTO-TR-1803.pdf>
5. Kaiser J., Eichmann K.-U., Noel S., Wuttke M., Skupin J., Savigny C., Rozanov A., Rozanov V., Bovensmann H., Burrows J. SCIAMACHY limb spectra // Advances in Space Research. 2004. Vol. 34. P. 715-720.
6. Shields J., Johnson R., Karr M. An Automated Observing System for Passive Evaluation of Cloud Cover and Visibility // Final Report SIO Ref, 92-22, MPL-U-65/92, University of California, San Diego, Marine Physical Laboratory. URL: <http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a263207.pdf>.
7. Skiff B.A. Catalogue of Stellar Spectral Classifications // Lowell Observatory. 2009-2014. URL: <http://vizier.u-strasbg.fr/viz-bin/VizieR?-source=B/mk>.
8. Ugolnikov O., Maslov I. Altitude and Latitude Distribution of Atmospheric Aerosol and Water Vapor from the Narrow-Band Lunar Eclipse Photometry // Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer. 2008. Vol. 109, P. 378-388.

Some results of monitoring marine horizon in the red and near infrared spectral ranges

I.A. Maslov ^{1,2}, V.A. Grishin ¹

¹Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia

E-mail: imaslov@iki.rssi.ru

²Moscow State University, P.K. Sternberg Astronomical Institute,

Moscow 119991, Russia

E-mail: IRLab@yandex.ru

Growing requirements for spacecraft and aircraft navigation reliability, especially in conditions of possible countermeasures, call for increasing the number of navigation information sources and their effective integration. One of such navigation information sources is observation of the horizon line which can be used both for the local vertical calculation and direct correlation-extremal navigation. The problem is that presence of dense Earth atmosphere seriously hampers observation of the horizon line on large optical paths (tens and hundreds of km). In this connection, the experimental investigation of horizon line observation possibility over the sea surface in a spectral band of 550–1000 nm was carried out. The obtained data point to the possibility of observation of the brightness distribution near the horizon line even in moonless night time. By using the stars, we made measurements of the values of atmosphere transmission near the horizon. The feasibility to estimate the flux of radiation from star in spectral band of 550–1000 nm via its magnitudes in the visible spectrum was tested and approved. It is assumed that the distribution of the energy spectrum corresponds to absolutely black body with temperature defined by the spectral type of the star. The gradients of increasing atmospheric transmission with increasing angle above the horizon were obtained in the range from 0,1 to 0,3 degrees⁻¹. The experimental results are to be used for comparison with the results of numerical calculation of the brightness of the horizon line and atmosphere transmission.

Keywords: navigation, monitoring, skyline, sea, atmosphere, the stars.

References

1. Maslov I.A., Grishin V.A., Vybór optimal'nogo spektral'nogo diapazona dlya nablyudeniya gorizonta Zemli (The Choice of the Optimal Spectral Range for Observation of the Earth Horizon), *Tekhnicheskoe zrenie*, 2013, No 1, pp. 2-4, available at: http://magazine.technicalvision.ru/publicftp/issue_1%281%29/%D0%A2%D0%B5%D1%85.%D0%B7%D1%80%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B5_1.pdf.
2. Rozenbush A.E., Vid'machenko A.P. Nekotorye kharakteristiki astroklimate na gore Koshka, Simeiz (Some characteristics of the astroclimate mountain Cat, Simeiz), *Kinematika i fizika nebesnykh tel*, 2011, Vol. 27, No. 6, pp. 72-76.
3. Ugol'nikov O.S., Maslov I.A., Mnogotsvetnaya polyarimetriya sumerechnogo neba. Rol' mnogokratnogo rasseyaniya sveta kak funktsiya dliny volny (Multicolor Polarimetry of the Twillight Sky: The Role of Multiple Light Scattering as a Function of Wavelength), *Kosmicheskie issledovaniya*, 2002, Vol. 40, No. 3, pp. 242-251.
4. Carr S. B., *The Aerosol Models in MODTRAN: Incorporating Selected Measurements from Northern Australia*. Edinburgh South Australia: DSTO Defence Science and Technology Organisation. 2005, 67 p.
5. Kaiser J., Eichmann K.-U., Noel S., Wuttke M., Skupin J. Savigny C., Rozanov A., Rozanov V., Bovensmann H., Burrows J., SCIAMACHY limb spectra, *Advances in Space Research*, 2004, Vol. 34, pp. 715-720.
6. Shields J., Johnson R., Karr M., *An Automated Observing System for Passive Evaluation of Cloud Cover and Visibility, Final Report SIO Ref, 92-22, MPL-U-65/92*, University of California, San Diego, Marine Physical Laboratory, available at: <http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a263207.pdf>.
7. Skiff B.A., *Catalogue of Stellar Spectral Classifications*, Lowell Observatory, 2009-2014, available at: <http://vizier.u-strasbg.fr/viz-bin/VizieR?-source=B/mk>.
8. Ugolnikov O., Maslov I., Altitude and Latitude Distribution of Atmospheric Aerosol and Water Vapor from the Narrow-Band Lunar Eclipse Photometry, *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2008, Vol. 109, pp. 378-388.