

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЕОВЕРТИКАЛИ ПО НАБЛЮДЕНИЮ ЛИМБА ЗЕМЛИ

М. С. Тучин, А. И. Захаров, М. Е. Прохоров

Государственное научное учреждение Государственный астрономический институт им. П. К. Штернберга Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова (ГАИШ), Москва

Предложен новый способ определения геовертикали — небесных координат центра Земли — при наблюдении с борта космического аппарата с точностью 1...3 угл. с. Обоснован выбор диапазона длин волн, в котором алгоритм функционирует наилучшим образом.

Ключевые слова: космическая навигация, геовертикаль, атмосфера, лимб Земли, рассеяние излучения.

Введение

В последнее время изображения Земли в разных спектральных диапазонах, полученные с борта космических аппаратов (КА) на высотах более 10 тыс. км, широко используются в различных областях: гидрометеорологии, экологии, оперативной картографии, космической навигации, а также для получения информации, необходимой для служб чрезвычайных ситуаций и т. п.

В большинстве случаев требуется с высокой точностью привязать положение целевых объектов на изображениях Земли к географическим координатам. Такая привязка требует знания точного положения КА относительно Земли, направления оси визирования в пространстве и угла поворота кадра вокруг этой оси. Направление оси визирования и угол поворота кадра можно определить с помощью звездных датчиков ориентации или другими способами. Точное положение КА в пространстве чаще всего определяют с Земли.

Погрешность большинства существующих датчиков геовертикали более 1' (например, датчики производства Sodern, Франция [Sodern, 2001, 2004]). Существует потребность в методе, позволяющем уменьшить погрешность до 1...5". Это соответствует погрешности определения координат на поверхности Земли порядка 100 м — 1 км с геостационарной орбиты (большая полуось орбиты $a \approx 42\,200$ км).

ОПИСАНИЕ МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГЕОВЕРТИКАЛИ

Предлагаемый метод основан на анализе изображения лимба Земли. Под лимбом Земли в данном случае подразумевается видимый светящийся ореол, окружающий изображение диска Земли и представляющий собой рассеянное в атмосфере Земли излучение. Если наблюдаемая часть атмосферы освещена прямым солнеч-

Тучин Максим Сергеевич — младший научный сотрудник, E-mail: wizard81@mail.ru.

Захаров Андрей Игоревич — научный сотрудник, E-mail: zakh@sai.msu.ru.

Прохоров Михаил Евгеньевич — ведущий научный сотрудник, доктор физико-математических наук, E-mail: mike.prokhorov@gmail.com.

ным излучением, то основным вкладом в излучение лимба будет однократное рассеяние. Другие части атмосферы, находящиеся в сумеречной зоне, светятся за счет многократного рассеяния излучения в атмосфере. И, наконец, существует ночная зона лимба, где рассеянный свет уже пренебрежимо мал.

Для определения положения центра Земли по изображению лимба в кадре необходимо выделить точки, которые находятся на одинаковой или известной высоте над поверхностью Земли.

Выбор точек на лимбе можно осуществлять несколькими способами. Например, могут выбираться точки изображения с одинаковой яркостью (изофоты). С помощью изофот можно определить центр изображения Земли. Для этого предварительно необходимо определить высоты изофот в различных частях лимба. Недостаток этого подхода заключается в том, что в различных частях лимба эта зависимость различна. Это обусловлено взаимным расположением КА, Земли и Солнца и влиянием отражения от облачного слоя и земной поверхности. Если первый фактор поддается учету, то облачный слой быстро и плохо предсказуемо изменяется со временем. Все это снижает точность определения координат центра Земли.

В нашем методе используются не абсолютные значения яркости изображения, а значения ее градиента в радиальном направлении (т. е. поперек лимба). Выделив на зависимости градиента яркости лимба от высоты устойчивые особые точки, мы сможем определить положение центра Земли относительно них. В качестве таких точек предлагается использовать максимальные значения абсолютной величины поперечного градиента яркости лимба.

Такой подход позволяет избавиться от зависимости положения выбранных на лимбе точек от освещенности, т. е. от влияния положения Солнца и переменности альbedo. Положение особых точек поперечного градиента яркости лимба обусловлено в основном результатом двух противодействующих явлений — рассеяния излучения в направлении КА (релеевского и аэрозольного) и ослабления излучения в атмосфере Земли. Оба этих явления связаны главным образом со строением атмосферы Земли, а не с положением источников рассеиваемого излучения.

Точность определения координат объектов на поверхности Земли или в атмосфере при наблюдении с геостационарной орбиты ($a \approx 42\,200$ км) по изофотам составляет 5...10 км. Точность второго метода может быть существенно выше, но для ее достижения требуется разрешение порядка сотен метров.

Важным фактором повышения точности предлагаемого метода является выбор спектрального диапазона излучения, в котором лучше всего наблюдать лимб для определения положения центра Земли.

При выборе спектрального диапазона необходимо учитывать следующие факторы:

- большинство современных приборов с зарядовой связью (ПЗС) (матрицы или линейки) эффективно работают в красной области видимого диапазона и в ближнем инфракрасном (ИК) диапазоне;
- в ультрафиолете (при длинах волн $\lambda < 0,32$ мкм) происходит практически полное поглощение излучения в атмосфере в полосах озона [Хргиан, 1973];
- в середине видимого диапазона (0,5...0,7 мкм) лежит полоса Шапью поглощения озоном [Хргиан, 1973];
- в ближнем ИК-диапазоне (0,8...1,0 мкм) на процессы поглощения излучения оказывают влияние полосы паров воды [Зуев, Комаров, 1986а].

Поскольку распределение озона весьма переменное во времени (как в течение года, так и в течение суток), необходимо исследовать, как распределение озона по высоте и его полное количество влияют на положение особых точек градиента [Хргиан, 1973; Зуев, Комаров, 1986б].

Влияние воды на поглощение в ближнем ИК-диапазоне существенно, но, так как практически вся газообразная вода лежит ниже 10 км, то на поведение яркости лимба на высотах около 20...30 км и выше она существенного влияния оказывать не должна.

МОДЕЛЬ ЛИМБА ЗЕМЛИ

Модель лимба Земли состоит из следующих частей:

- модель строения атмосферы Земли в различных ее точках (на разных широтах и долготах) в различные сезоны [Зуев, Комаров, 1986а];
- модель переноса излучения в атмосфере Земли, учитывающая:
 - поглощение в линиях/полосах атмосферными газами [Зуев, Комаров, 1986б; Кабанов, 1983; Донченко, Кабанов, 1983];
 - релеевское рассеяние на молекулах воздуха [Кабанов, 1983];
 - аэрозольное рассеяние [Донченко, Кабанов, 1983; Кабанов, Панченко, 1984; Ивлев, Довгалюк, 1999].

Модель строения атмосферы представляет собой зависимость от высоты над уровнем моря параметров различных компонентов атмосферы: температуры и давления чистого сухого воздуха, концентраций озона, водяного пара, общего аэрозоля (под общим аэрозолем подразумевается смесь, без разделения на различные составляющие). Такое построение создается для заданного сезона, долготы и широты места. Численные данные по строению атмосферы брались из [COSPAR, 1986; BADC; WDC-RSAT].

Для вычисления поглощения излучения была использована система генерации спектров [SPECTRA], которая, в свою очередь, использует базы данных параметров спектральных линий HITRAN, GEISA и др.

Перенос излучения рассчитывался интегрированием уравнения переноса для двух случаев — однократного и двукратного рассеяния. Уравнение переноса может быть записано в таком виде:

$$dI(\vec{r}, \vec{\theta}) = -d\tau_{ext}(\vec{r})I(\vec{r}, \vec{\theta}) + \int_{4\pi} k_{scat}(\vec{r})i(\vec{\theta}, \vartheta)I(\vec{r}, \vec{\vartheta})d\vec{\vartheta},$$

где I — интенсивность излучения; τ_{ext} — оптическая толщина атмосферы (ослабление излучения); \vec{r} — вектор положения точки в атмосфере в системе координат, связанной с началом в центре Земли; $\vec{\theta}$ — вектор направления выходящего излучения из точки интегрирования; $\vec{\vartheta}$ — вектор направления приходящего рассеянного и прямого солнечного излучения в точке интегрирования; k_{scat} — коэффициент релеевского или аэрозольного рассеяния; $i(\vec{\theta}, \vec{\vartheta})$ — индикатриса рассеяния.

В случае однократного рассеяния формула для вычисления потока рассеянного излучения, проходящего через объектив площадью S_0 с направления, ограниченного телесным углом $\Delta\Omega$, имеет вид [Зуев, Комаров, 1986б]:

$$F_1 = \Delta\Omega S_0 r_{KA} \sin\varphi' \cdot \cos\psi \times \left\{ \frac{\pi^2}{2} \int_X \int_{\xi_A}^{\xi_B} X(\lambda) \lambda^{-4} E_\lambda^0 \frac{[n_\lambda^2(h) - 1]^2 e^{-\tau_\lambda(h, z_0) - \tau_\lambda(h, z_{KA})}}{N(h) \sin^2(\varphi' + \xi)} (1 + \cos^2 \gamma_0) d\xi d\lambda + \int_X \int_{\xi_A}^{\xi_B} X(\lambda) E_\lambda^0 \frac{K_\lambda^{az}(h) e^{-\tau_\lambda(h, z_0) - \tau_\lambda(h, z_{KA})}}{\sin^2(\varphi' + \xi)} I_\lambda^{az}(h, \gamma_0) d\xi d\lambda \right\},$$

где r_{KA} — расстояние от КА до центра Земли; ψ — угол между горизонтальной плоскостью в системе координат, связанной с КА, и направлением прихода излучения; φ' — угол из КА между направлением на центр Земли и направлением на точку интегрирования (рассеяния солнечного излучения); ξ — переменная интегрирования — угол между направлением на точку интегрирования и направлением на КА из центра Земли (ξ_A, ξ_B — начальная и конечная точки интегрирования); $n_\lambda(h)$ — показатель преломления для длины волны λ в атмосфере на высоте h ; $N(h)$ — число молекул в единице объема газа на высоте h ; λ — длина волны излучения; $\tau_\lambda(h, z_0)$ — оптическая толщина в направлении от элемента объема интегрирования на Солнце; $\tau_\lambda(h, z_{KA})$ — оптическая толщина в направлении от элемента объема интегрирования на КА; z_0 и z_{KA} — зенитные расстояния Солнца и КА в точке рассеяния; E_λ^0 — внеатмосферная спектральная плотность энергетической солнечной освещенности; $X(\lambda)$ — кривая реакции прибора; $S_0 \cos\psi$ — световая площадь объектива; γ_0 — направление рассеяния — угол, дополнительный до 180° , из точки интегрирования между направлениями на Солнце и на КА, $I_\lambda^{az}(h, \gamma_0)$ — индикатриса аэрозольного рассеяния, $K_\lambda^{az}(h)$ — коэффициент аэрозольного рассеяния.

Используемые в этой формуле геометрические обозначения поясняются на рис. 1, а процедура интегрирования вдоль луча зрения — на рис. 2 (см. с. 104).

Модель производит расчет изображения лимба Земли для любой освещенной Солнцем части за исключением областей полярных шапок, где недостает данных о строении атмосферы.

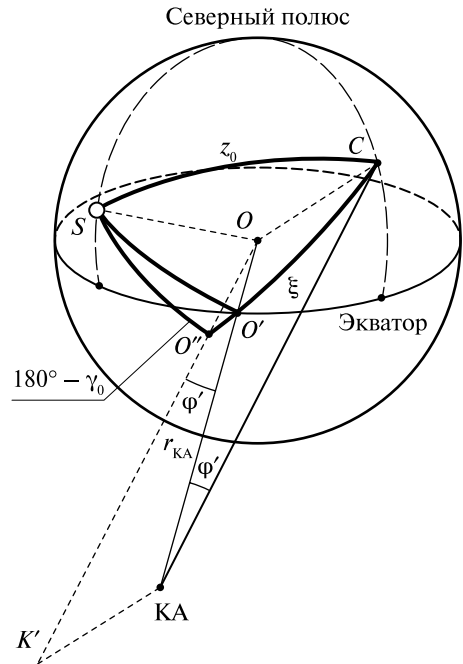


Рис. 1. Геометрия переноса излучения в атмосфере Земли: точка O — центр Земли; C — точка интегрирования (точка в атмосфере, рассеянный свет от которой попадает в объектив); O' — подспутниковая точка; OK' — линия, параллельная линии C –КА; O'' — точка пересечения линии OK' с Землей; CO' — дуга, равная ξ ; CO'' — дуга, равная z_{KA} ; S — центральная проекция положения Солнца на Землю; SO'' — дуга, равная $180^\circ - \gamma_0$

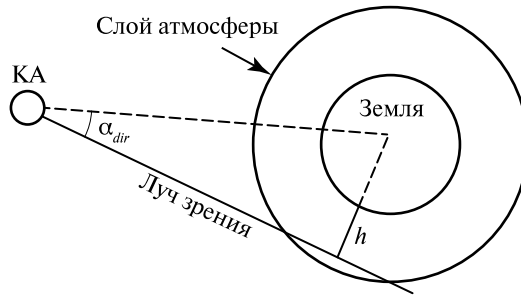


Рис. 2. Рассеяние излучения на луче зрения в атмосфере Земли: α_{dir} — угол между направлением на центр Земли и лучом, проходящим на высоте h над поверхностью Земли

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Расчет яркости лимба Земли и его градиента проводился для случая КА на геостационарной орбите. Принималось, что расстояние от КА до центра Земли — 42 200 км, а орбита КА находится в плоскости экватора. Расчет проведен для нескольких различных случаев в экваториальной области и представлен на рис. 3–5 (рис. 4, 5 см. с. 105). В расчете использовалась зимняя (январь) модель атмосферы Земли на экваторе. По оси абсцисс на графиках отложено либо угловое расстояние направления, из которого приходит рассеянное излучение от направления на центр Земли (α_{dir}), либо высота точки касания прямой вдоль наблюдаемого направления сферического слоя в атмосфере Земли (h). Эти две величины связаны формулой

$$\sin \alpha_{dir} = \frac{h + R_{\oplus}}{r_{КА}}, \quad (\delta \alpha_{dir} [\text{угл. с}] \approx 4,95 \delta h [\text{км}]),$$

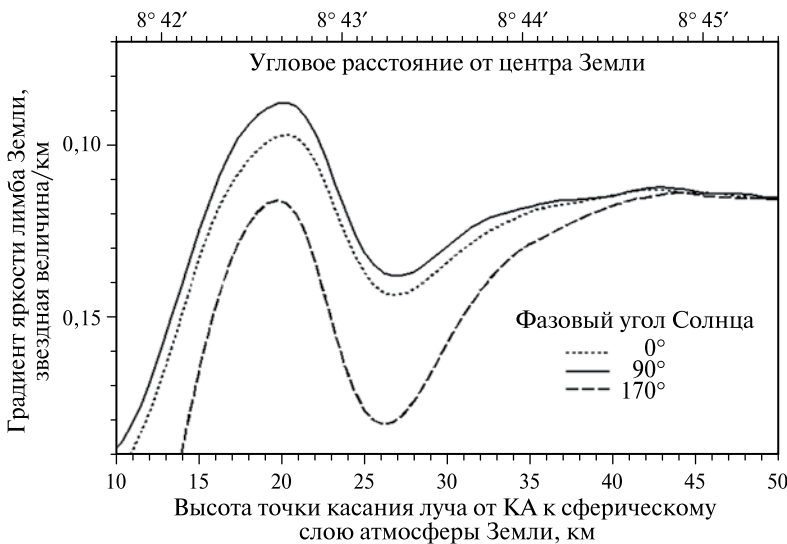


Рис. 3. Зависимость градиента яркости лимба от высоты для нескольких значений фазового угла Солнце – Земля – КА при учете только однократного рассеяния в диапазоне длин волн 0,50...0,65 мкм

где $r_{КА}$ — расстояние от центра Земли до КА; R_{\oplus} — радиус Земли. По оси ординат дан градиент яркости лимба Земли по высоте, выражаемый в звездных величинах на километр,

$$\frac{dB}{dh} \approx -\frac{1,086}{F} \frac{dF}{dh}, \quad \left(\frac{dB}{d\alpha_{dir}} \approx -\frac{1,086}{F} \frac{dF}{d\alpha_{dir}} \approx -\frac{0,2194}{F} \frac{dF}{dh} \right),$$

здесь F — вычисляемый в модели поток рассеянного излучения.

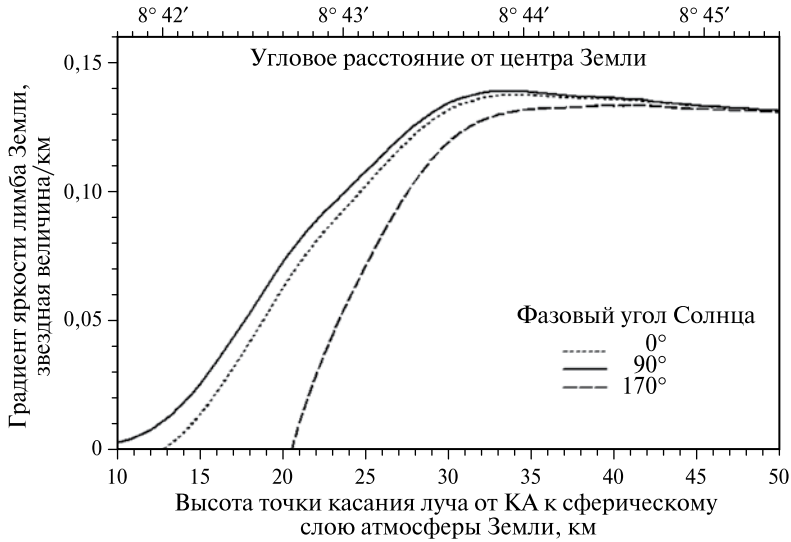


Рис. 4. То же, что на рис. 3, в диапазоне длин волн 0,34...0,48 мкм

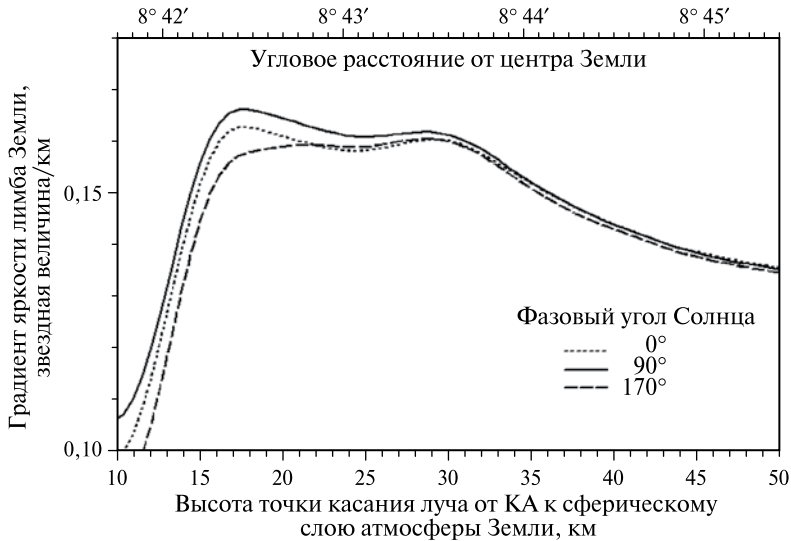


Рис. 5. То же, что на рис. 3, в диапазоне длин волн 0,7...0,9 мкм

На всех графиках высота над уровнем моря составляет 10...50 км. Градиенты яркости выше 50 км в текущей модели не имеют никаких особенностей. Ниже 10 км, особенно на небольших высотах над уровнем моря, сильно влияние приземного слоя, который довольно сложно учитывать. Так же в пределах 10 км лежит основная масса водяного пара, сильно поглощающего в полосах, и, ввиду того, что водяной пар сильно варьируется в зависимости от широты и времени года, его учет тоже затруднителен.

На рис. 3 показаны зависимости градиента яркости от высоты точки касания (однократное рассеяние в диапазоне длин волн 0,50...0,65 мкм) для нескольких значений фазового угла Солнце – Земля – КА. Видно, что максимум градиента расположен практически в одном и том же месте для различных случаев положения Солнца. Аналогичная картина наблюдается и для других диапазонов длин волн (см. рис. 4 и 5).

На рис. 6 изображен график зависимости градиента яркости однократного рассеяния для различных случаев распределения озона, наблюдаемых в диапазоне длин волн 0,50...0,65 мкм. Распределение озона по высоте в атмосфере показано на рис. 7 (см. с. 107). Данные об озоне взяты из [BADC]. Видно, что положение максимума градиента яркости сильно зависит от положения максимума в распределении озона. При определении координат центра Земли по положению максимума градиента яркости в диапазоне длин волн 0,50...0,65 мкм необходимо учитывать влияние озона.

Поскольку распределение озона сильно варьируется во времени, для датчика геовертикали следует использовать диапазон длин волн, в котором влияние озона слабó.

В инфракрасном диапазоне картину может испортить водяной пар, так как его распределение, как и озона, весьма переменено. Но водяной пар практиче-

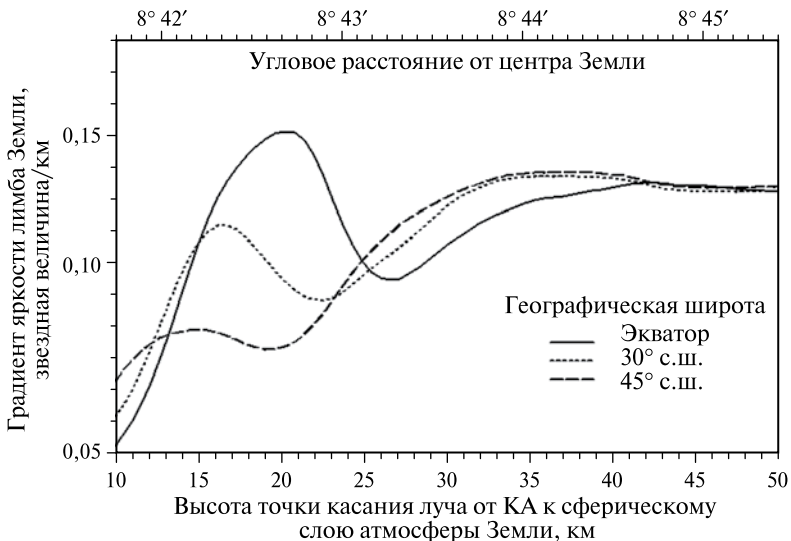


Рис. 6. Влияние распределения озона на градиент яркости лимба (распределение озона на различных широтах показано на рис. 7)

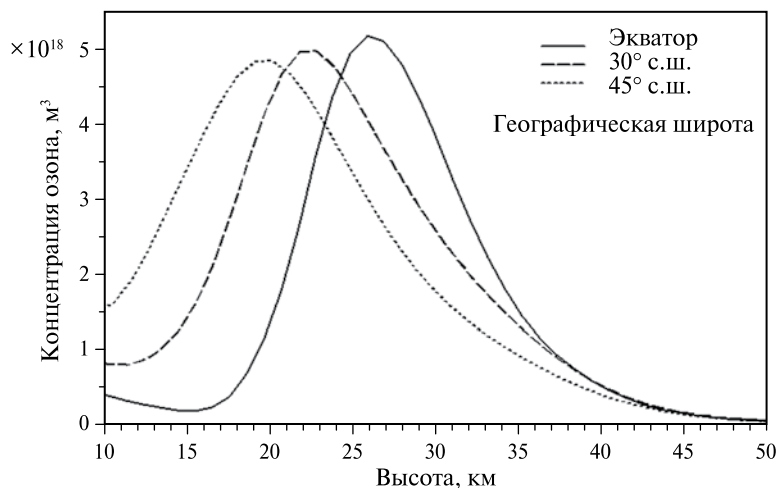


Рис. 7. Профиль распределения озона с высотой на разных широтах

ски весь лежит ниже 10 км по высоте над уровнем моря и будет влиять главным образом только на излучение, приходящее с низких высот. Максимум градиента в области длин волн 0,7...0,9 мкм ожидается на высоте 17 км (модель атмосферы, включающая только релеевское рассеяние). Для ПЗС-матриц с максимумом кривой реакции, лежащим в ближней части ИК-диапазона, лучше подходит именно этот диапазон длин волн. Следует заметить, что в ближнем ИК-диапазоне лимб Земли гораздо слабее, чем в видимом, и тем более в ультрафиолетовом (УФ), из-за низкого коэффициента релеевского рассеяния, пропорционального λ^{-4} .

В голубой части видимого диапазона и ближнем УФ (диапазон длин волн 0,34...0,48 мкм) существует окно прозрачности, в котором практически отсутствуют поглощения газами. Кроме того, в этой области коэффициент рассеяния выше, чем в видимой. Приблизительно с 0,3 мкм в сторону более коротких волн начинается полоса Гартли поглощения озоном, в которой атмосфера становится непрозрачной. Полоса Шапюи расположена на длинах волн 0,45...0,75 мкм. Градиент яркости в центре этого диапазона (0,50...0,65 мкм) показан на рис. 3.

На рис. 8 (см. с. 108) изображены зависимость от высоты точки касания градиента яркости однократного рассеяния и суммы однократного и двукратного рассеяния в двух диапазонах: 0,34...0,48 мкм и 0,50...0,65 мкм. Видны характерные точки градиента: в случае длин волн 0,50...0,65 мкм — это максимум кривой, в случае 0,34...0,48 мкм — точки характерного изгиба кривой. Видно, что учет двукратного рассеяния не слишком сильно влияет на градиент яркости. Можно предположить, что рассеяние более высоких порядков влияет на картину еще меньше, и этими эффектами можно пренебречь.

Наши расчеты показали также, что отражение прямого солнечного излучения (по закону Ламберта) от поверхности Земли или облаков слабо влияет на положение особых точек градиента яркости в приведенных диапазонах длин волн (рис. 9, см. с. 108).

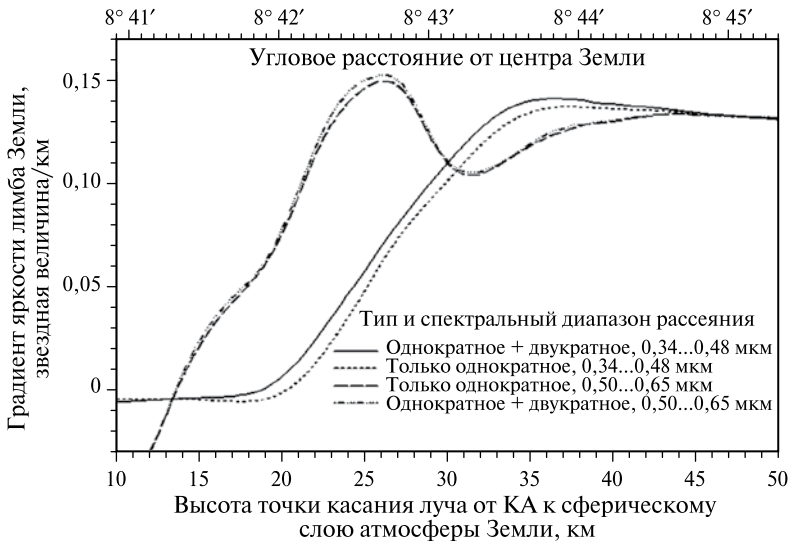


Рис. 8. Влияние учета двукратного рассеяния в атмосфере на градиент яркости лимба для двух спектральных диапазонов: 0,34...0,48 и 0,50...0,65 мкм

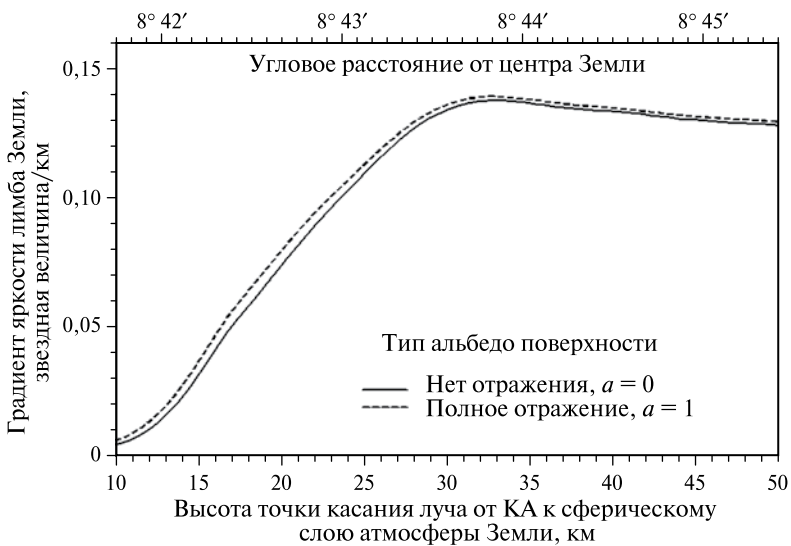


Рис. 9. Влияние на градиент яркости лимба отражения от поверхности Земли или облачного слоя. Диапазон длин волн 0,34...0,48 мкм. Закон отражения предполагался ламбертовским

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Настоящая работа посвящена выяснению применимости метода определения геовертикали по анализу градиента яркости лимба Земли. Исследование применимости проводилось в виде численного моделирования рассеяния света атмосферой Земли. В ходе работы было показано, что на радиальной (поперечной) зависимо-

сти градиента яркости лимба можно найти особые точки — максимумы градиента, — стабильные по высоте, которая определяется в основном строением атмосферы. Также был выяснен спектральный диапазон, в котором выгоднее всего производить измерения — синий и ближний УФ-участки спектра в интервале длин волн 0,34...0,48 мкм.

Оценки показывают, что точность определения координат центра Земли в первую очередь определяется разрешающей способностью используемой в датчике аппаратуры и может достигать единиц угловых секунд и даже долей секунды.

Одним из очевидных применений высокоточного датчика геовертикали является координатная привязка изображений Земли высокого разрешения, которые сегодня получают в метеорологии и при дистанционном зондировании Земли (ДЗЗ).

Другое применение предлагаемого датчика геовертикали — создание автономной системы определения орбиты КА. Система состоит из высокоточных датчиков геовертикали и звездной ориентации и бортовых часов. Датчик геовертикали определяет направление от КА на центр Земли, противоположное ему направление — из центра Земли на КА. Оба этих направления датчик геовертикали задает относительно конструкционных осей КА. Одновременные или квазиодновременные показания датчиков геовертикали и звездной ориентации позволяют определить направление геовертикали в системе координат, связанной со звездами (например, в экваториальной). Вектор из КА в центр Земли указывает направление геовертикали, противоположный вектор определяет положение КА для наблюдателя, расположенного в центре Земли. Серия подобных измерений позволяет автономно определить невозмущенную или возмущенную орбиту КА. Проведенное авторами моделирование показало, что серия из 48 измерений в течение суток для КА в геостационарной области позволяет автономно определить его положение с точностью до десятков метров.

В заключение хотелось бы отметить, что изображения лимба Земли в различных спектральных диапазонах позволяют решать важные задачи метеорологии и экологии: определять профили концентраций озона, аэрозолей, других компонентов атмосферы.

Литература

- Донченко В. А., Кабанов М. В. (1983) Рассеяние оптических волн дисперсными средами. Ч. 2. Система частиц. Томск: ТФ СО РАН СССР. 1983. 185 с.
- Ивлев Л. С., Довгалюк Ю. А. (1999) Физика атмосферных аэрозольных систем. СПб.: НИИХ СПбГУ. 1999. 194 с.
- Зуев В. Е., Комаров В. С. (1986а) Статистические модели температуры и газовых компонент атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1986.
- Зуев В. Е., Комаров В. С. (1986б) Оптические модели атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1986.
- Кабанов М. В. (1983) Рассеяние оптических волн дисперсными средами. Ч. 1 Отдельные частицы. Томск: ТФ СО РАН СССР. 1983. 135 с.
- Кабанов М. В., Панченко М. В. (1984) Рассеяние оптических волн дисперсными средами. Ч. 3. Атмосферный аэрозоль. Томск: ТФ СО РАН СССР. 1984. 189 с.
- Хржан А. Х. (1973) Физика атмосферного озона. Л.: Гидрометеиздат. 1973.
- BADC. База данных "The British Atmospheric Data Centre" [Электрон. ресурс]. Режим доступа: <http://badc.nerc.ac.uk/home/>.

COSPAR. (1986) International Reference Atmosphere. (CIRA-86). 1986.

Sodern. (2001) STD 16 Earth Sensor. EADS: Sodern, 2001 [Электрон. ресурс]. Режим доступа: http://www.sodern.fr/site/docs_wsw/fichiers_communs/docs/STD16.pdf.

Sodern. (2004) STD 15 Earth Sensor. EADS: Sodern, 2004 [Электрон. ресурс]. Режим доступа: http://www.sodern.fr/site/docs_wsw/fichiers_communs/docs/STD15.pdf.

СПЕКТРА. Информационная система СПЕКТРА [Электрон. ресурс]. Режим доступа: <http://spectra.iao.ru/>.

WDC-RSAT. The Global Ozone Monitoring Experiment (on-board the second European Remote Sensing Satellite) [Электрон. ресурс]. Режим доступа: http://wdc.dlr.de/data_lib/GOME/ROSE/data/O3/.

GEOVERTICAL DETERMINATION FROM OBSERVATIONS OF EARTH'S LIMB

M. S. Tuchin, A. I. Zakharov, M. E. Prokhorov

Sternberg Astronomical Institute of Moscow State University (SAI), Moscow

The new way of a geovetical determination is offered from a board of the space vehicle with accuracy 1...3". The choice of the most convenient range wavelengths is proved.

Keywords: space navigation, geovetical, atmosphere, Earth's limb, light scattering.

Tuchin Maxim Sergeevich — junior research scientist, E-mail: wizard81@mail.ru.

Zakharov Andrey Igorevich — research scientist, E-mail: zakh@sai.msu.ru.

Prokhorov Mikhail Evgenievich — leading research scientist, doctor of physical and mathematical science, E-mail: mike.prokhorov@gmail.com.