

Возможности навигационных измерений по лимбу Земли в видимом и ближнем ИК диапазоне

Б.С. Жуков, С.Б. Жуков, А.А. Форш

*Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия
E-mails: bzhukov@iki.rssi.ru, forsh@ofo.iki.rssi.ru*

Датчики горизонта помимо определения ориентации космического аппарата (КА) могут использоваться также для оценки его положения относительно наблюдаемого тела. Автономная навигация КА по горизонту может резервировать измерения с помощью навигационных систем ГЛОНАСС/GPS на орбитах вокруг Земли и заменять их на орбитах вокруг других тел Солнечной системы. Существующие космические датчики горизонта работают, в основном, в тепловом ИК диапазоне. Переход в видимый и ближний ИК диапазон (0,4–1 мкм) позволит создавать более простые и дешевые приборы. Поскольку в этом диапазоне горизонт Земли из космоса не виден из-за большой оптической толщины атмосферы, стоит задача определения условного горизонта на лимбе Земли, образуемом при рассеянии солнечного света в атмосфере. В результате расчетов переноса излучения в атмосфере с помощью программы MODTRAN и обработки изображений, полученных с геостационарного ИСЗ GOES-East, наиболее устойчивым оказалось определение высоты условного горизонта по половине максимальной яркости лимба. Хотя вариации высоты условного горизонта минимальны в синем участке спектра, может быть целесообразно использование более длинноволновых участков видимого и ближнего ИК диапазона, в которых возможна одновременная навигация по ориентирам на земной поверхности. Ключевым параметром космических датчиков горизонта, который наиболее сильно влияет на точность оценки положения КА, является их поле зрения, которое должно выбираться максимально большим, даже за счет ухудшения разрешения, и в идеале захватывать всю Землю. Средняя высота условного горизонта в диапазоне 0,5–0,7 мкм составила ~19 км, ошибка (1σ) определения его высоты, а также координат КА на низких орбитах с высотой до 1000 км – 2–3 км при разрешении на лимбе от 1 до 10 км. На геостационарной орбите ошибка оценки высоты КА увеличивается до 20 км. Ошибки определения орбиты могут быть значительно уменьшены при накоплении измерений вдоль орбиты.

Ключевые слова: автономная космическая навигация, навигация по горизонту, датчики горизонта, лимб Земли, условный горизонт

Введение

Датчики горизонта помимо традиционного применения – определения ориентации космического аппарата (КА) могут использоваться также для оценки его положения относительно наблюдаемого тела. Для этого по детектированной дуге горизонта должны находиться направление на центр тела и его угловой размер, по которому можно определить расстояние до тела (известных размеров). Например, для сферического тела радиусом R_0 расстояние от КА до его центра можно найти по соотношению:

$$L = R_0 / \sin \alpha , \quad (1)$$

где α – угловой радиус тела (рис. 1).

Переход от приборной к инерциальной системе координат осуществляется по данным звездных датчиков об ориентации КА.

Автономная навигация КА по горизонту может резервировать измерения с помощью навигационных систем ГЛОНАСС/GPS на орбитах вокруг Земли и заменять их на орбитах вокруг других тел Солнечной системы. Отработку подобных систем навигации естественно проводить на орбитах вокруг Земли.

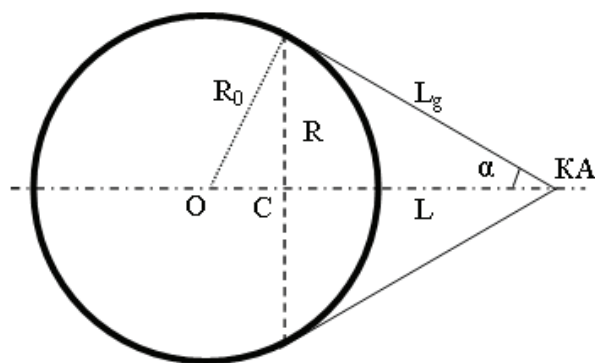


Рис. 1. Геометрия наблюдения: O – центр Земли, C – центр видимого диска, R_0 – радиус Земли, R – радиус видимого диска, α – угловой радиус Земли, L – расстояние до центра Земли, L_g – расстояние до горизонта

Навигация по горизонту Земли осложняется тем, что в оптическом диапазоне линия горизонта не видна даже в безоблачных условиях из-за большой оптической толщины атмосферы при скользких углах наблюдения и, кроме того, в большинстве случаев закрыта облаками. Вокруг Земли наблюдается лимб – светящийся за счет рассеяния солнечного света слой атмосферы толщиной в десятки километров. В этой ситуации необходимо определить по лимбу условный горизонт, к которому можно было бы привязывать навигационные измерения (в частности, значения R_0 , R , α , L_g на рис. 1). Условный горизонт может не совпадать с истинным – важнее, чтобы он мог быть максимально стабильно привязан по высоте.

Современные космические ИК датчики горизонта работают, в основном, в полосах поглощения CO_2 в тепловом ИК диапазоне, где до датчика доходит, в основном, лишь излучение слоев атмосферы выше тропопаузы. Примерами могут служить широко используемые датчики горизонта НПП «Геофизика-Космос» (www.geofizika-cosmos.ru) и фирмы SODERN (www.sodern.com). Угловая ошибка (1σ) указанных ИК датчиков горизонта при наблюдении с низких орбит высотой 400–1000 км оценивается в 1–2 угл. мин, что соответствует 1–2 км на лимбе. Из-за отсутствия матричных тепловых ИК детекторов достаточно большого размера в подобных приборах для обеспечения большого угла наблюдения используется механическое сканирование.

Переход в видимый и ближний ИК диапазон (0,4–1 мкм), для которого существуют матричные приемники излучения большого размера, позволяет значительно упростить и удешевить аппаратуру, а также одновременно проводить навигационные измерения по горизонту и по ориентирам на поверхности Земли, например, по береговой линии (Егошкин и др., 2009). Недостатком наблюдений в этом диапазоне является сильное влияние облачности и поверхности на профиль яркости лимба, приводящее к повышенной неопределенности высоты условного горизонта.

Целью настоящей статьи является анализ потенциальной точности определения положения КА по наблюдениям лимба Земли в видимом и ближнем ИК диапазоне.

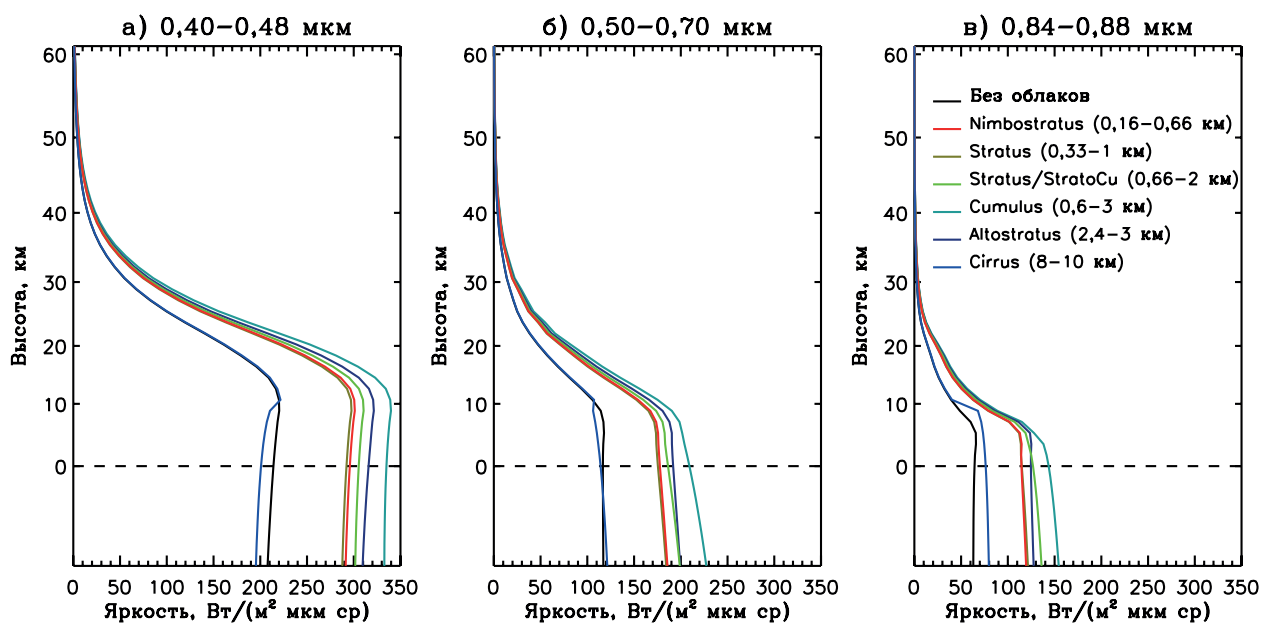


Рис. 2. Вертикальные профили яркости лимба Земли по результатам модельных расчетов в зависимости от спектрального диапазона и типа облаков

Критерии определения условного горизонта Земли

Для анализа критериев определения условного горизонта Земли с помощью программы MODTRAN рассчитывались вертикальные профили яркости лимба в случае однородной атмосферы. Рассматривались три спектральных диапазона:

- «синий»: 0,40–0,48 мкм, в котором отсутствуют полосы поглощения атмосферных газов, но наиболее сильно влияние молекулярного рассеяния;
- «зелено-красный»: 0,50–0,70 мкм, в котором молекулярное рассеяние слабее, но присутствуют полосы Шапнюи поглощения озона; несмотря на то, что эти полосы относительно слабы, наблюдение горизонта по наклонным трассам делает их эффект существенным;
- «ближний ИК»: 0,84–0,88 мкм, где молекулярное рассеяние слабо.

При расчетах варьировалось альbedo поверхности, содержание озона и тип облачного покрова. Рис. 2 показывает вертикальные профили яркости лимба в случае безоблачной атмосферы и при наличии однородного облачного покрова разных типов. Вследствие сильной зависимости яркости лимба от вариаций характеристик поверхности и атмосферы определение условного горизонта, например, по превышению уровня фона, было бы мало стабильным. Критерий максимума яркости применяется для определения условного горизонта в УФ-диапазоне, где выраженный максимум наблюдается на высотах 50–60 км (например, Kaiser et al., 2004). Однако, в синем диапазоне максимум яркости на лимбе выражен слабо, а в более длинноволновых диапазонах может наблюдаться как над горизонтом, так и под ним.

В качестве простых критериев определения высоты условного горизонта в данной работе анализировались критерии максимума градиента яркости (MAXGRAD) и половины максимума яркости (MAX/2). В табл. 1 приведены интервалы изменения высоты условного

Таблица 1. Интервалы изменения высоты условного горизонта при варьировании характеристиками поверхности и атмосферы

Условия наблюдения	Критерий	Спектральные зоны, мкм		
		0,40 – 0,48	0,50 – 0,70	0,84 – 0,88
Вариации альbedo поверхности: 0 – 0,9	MAX/2	24,6 – 24,7	15,7 – 18,2	9,6 – 14,0
	MAXGRAD	22,0 – 22,0	12,7 – 14,7	8,7 – 10,7
Вариации содержания озона: 0,29 – 0,44 атм см	MAX/2	24,6 – 24,7	16,9 – 18,1	12,5 – 12,5
	MAXGRAD	22,0 – 22,0	12,7 – 14,7	8,7 – 8,7
Вариации типов облаков	MAX/2	24,6 – 24,7	15,1 – 18,1	9,3 – 12,5
	MAXGRAD	22,0 – 22,0	12,7 – 14,7	8,7 – 10,7

горизонта, определенные по этим критериям, при варьировании характеристиками поверхности и атмосферы.

Полученные результаты показывают, что:

- оптимальным для определения условного горизонта является «синий» диапазон, где доминирует молекулярное рассеяние, и потому он менее чувствителен к характеристикам поверхности и атмосферы; этот вывод согласуется с результатами работы (Тучин и др., 2011); в этом случае оба рассмотренных критерия дают стабильную, хотя и разную привязку по высоте;
- в «зелено-красном» и ближнем ИК диапазонах разброс привязки условного горизонта по высоте составляет 2–3 км.

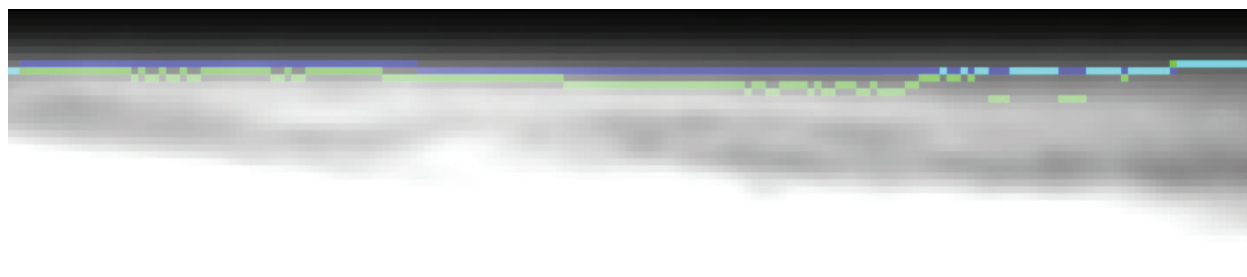


Рис. 3. Фрагмент снимка с ИСЗ GOES-East, показывающий неоднородную облачность на лимбе: зеленый цвет обозначает условный горизонт, определенный по критерию MAXGRAD, синий – по критерию MAX/2, циан – соответствует случаю, когда оба критерия совпадают

Стабильность рассмотренных критериев в реальной неоднородной атмосфере анализировалась по снимкам, полученным с ИСЗ GOES-East в диапазоне 0,5–0,7 мкм (к сожалению, съемочные системы на GOES и других геостационарных ИСЗ, наблюдающие лимб Земли, не имеют каналов в синем диапазоне). При наличии на лимбе неоднородной облачности критерий MAXGRAD, который очень чувствителен к границам облаков, приводит к сильным вариациям границы условного горизонта (рис. 3). В некоторых случаях он детектирует условный горизонт под реальным горизонтом. Критерий MAX/2 оказался в этих условиях более устойчивым даже с учетом некоторого произвола в выборе интервала высот, на котором ищется максимум яркости в области лимба (в данной работе он выбирался равным 50 км, начиная от высоты превышения фона).

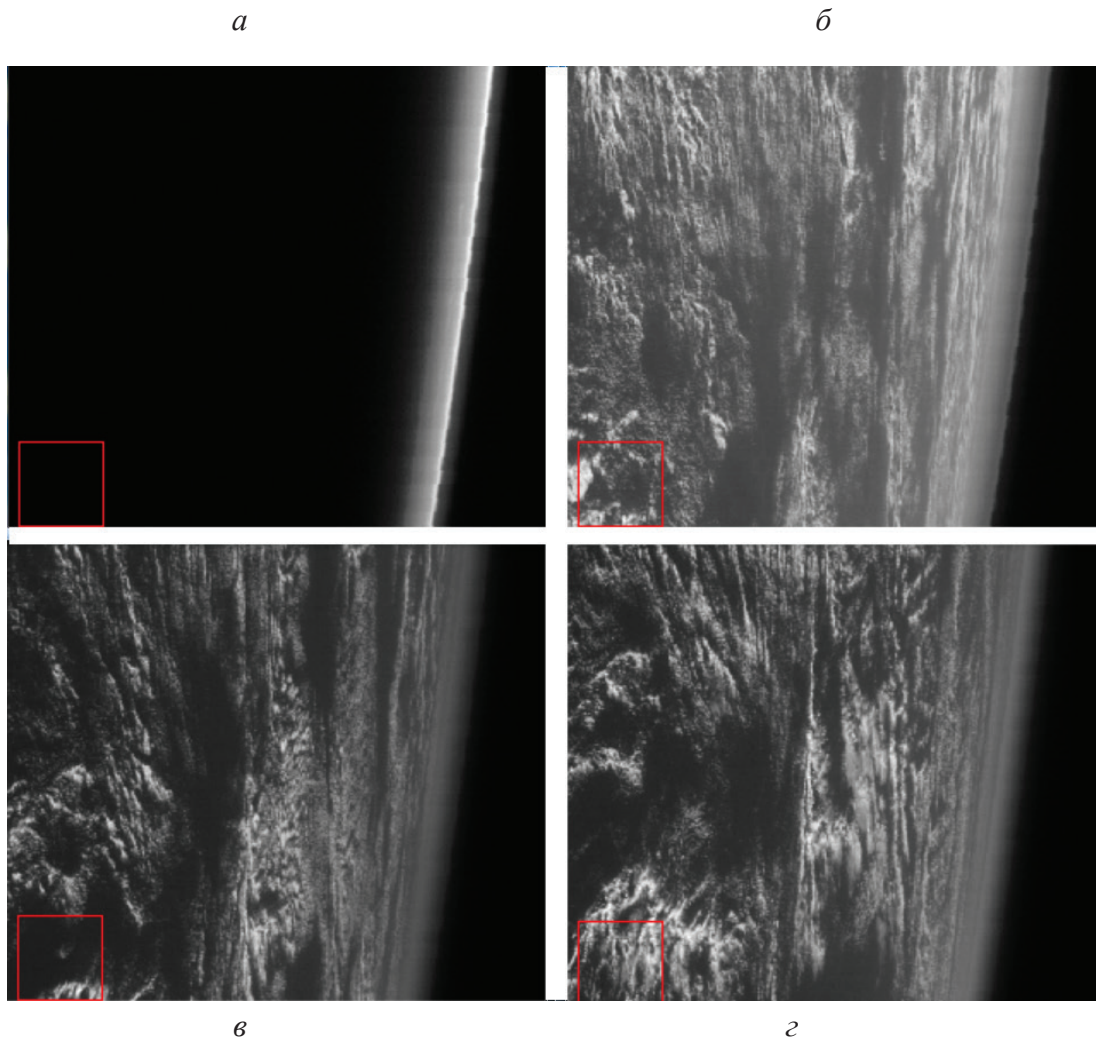


Рис. 4. Изображения ночного (а), утреннего (б) и дневного (в-г) лимба, полученные GOES-East

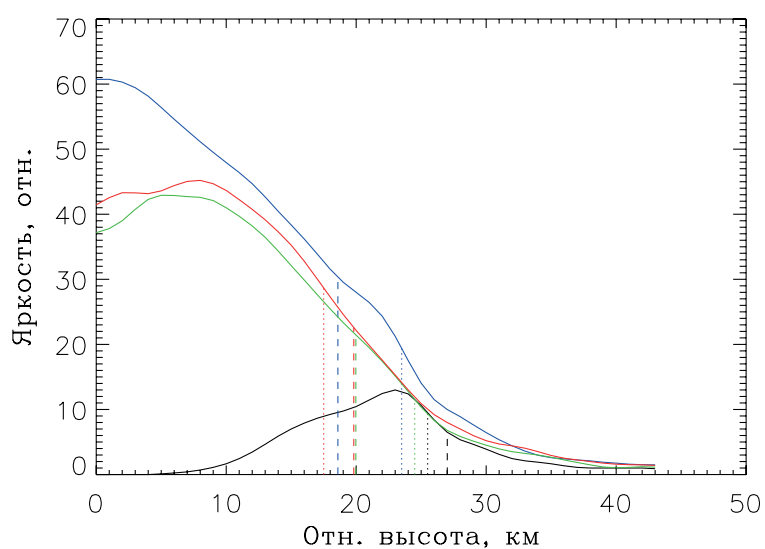


Рис. 5. Профили яркости лимба и положение условного горизонта, полученное по критерию MAX/2 (штриховая линия) и MAXGRAD (пунктирная линия) для ночного лимба (черный), утреннего (синий) и двух дневных лимбов (зеленый и красный), показанных на рис. 4

Условная граница горизонта, определенная по ночному лимбу (т.е. лимбу, образующемуся в результате рассеяния в атмосфере света Солнца, которое находится под горизонтом), расположена значительно выше условной границы дневного горизонта – см. фрагменты изображений GOES с ночным, утренним и дневным лимбом на *рис. 4* и соответствующие профили яркости лимба на *рис. 5*.

Оценка потенциальной точности навигации по горизонту на основе модельных расчетов

Для случая наблюдения сферического тела были проведены модельные расчеты точности оценки радиуса и направления на центр его изображения по наблюдениям горизонта.

Пусть среднеквадратическая ошибка единичного измерения высоты горизонта равна σ_H . Для Земли σ_H определяется помимо разрешения съемочной системы также неопределенностью высоты условного горизонта и, как обсуждалось выше, может достигать нескольких километров в зависимости от спектрального диапазона.

На ошибку определения координат центра и радиуса изображения тела также существенное влияние оказывает горизонтальный интервал независимых измерений точек горизонта Δ , который определяется разрешением и интервалом автокорреляции высоты условного горизонта, который в условиях неоднородной атмосферы зависит, в частности, от размера облачных полей. При расчетах значения Δ задавались равными 0,01; 0,1; 1 и 10°, что для Земли примерно соответствуют 1, 10, 100 и 1000 км на горизонте. В соответствии с этим при моделировании на дуге окружности с углом раствора φ выбирались точки с интервалом Δ и к их координатам добавлялась случайная некоррелированная ошибка по высоте с нормальным распределением и среднеквадратическим отклонением (СКО) σ_H . Полученные точки аппроксимировались окружностью. По 100 реализациям распределения ошибки высоты находились СКО координат центра изображения тела σ_X и σ_Y и его радиуса σ_R от истинных значений. При этом считалось, что ось X соответствует оси симметрии изображения горизонта (т.е. проекции направления освещения на плоскость изображения), а ось Y перпендикулярна оси симметрии.

Ошибки σ_X , σ_Y и σ_R приведены на *рис. 6* в зависимости от угла раствора дуги горизонта φ и интервала Δ . Все ошибки определялись по отношению к ошибке единичного измерения высоты горизонта σ_H .

При уменьшении угла раствора дуги горизонта φ от 360 до ~180° ошибки оценки координат центра σ_X и σ_Y практически не изменяются, при дальнейшем уменьшении φ начинают возрастать, причем особенно быстро, когда φ становится меньше ~100°, а при φ менее 30–50° могут значительно превышать величину σ_H . При этом σ_X возрастает значительно быстрее, чем σ_Y . Ошибки оценки радиуса σ_R близки к σ_X .

Ошибки определения параметров аппроксимирующей окружности быстро возрастают также при увеличении интервала Δ . Например, при $\Delta = 0,01^\circ$ и при $\varphi > 100^\circ$ ошибки находятся в интервале (0,01–0,1) σ_H , а при $\Delta = 10^\circ$ могут в несколько раз превышать σ_H .

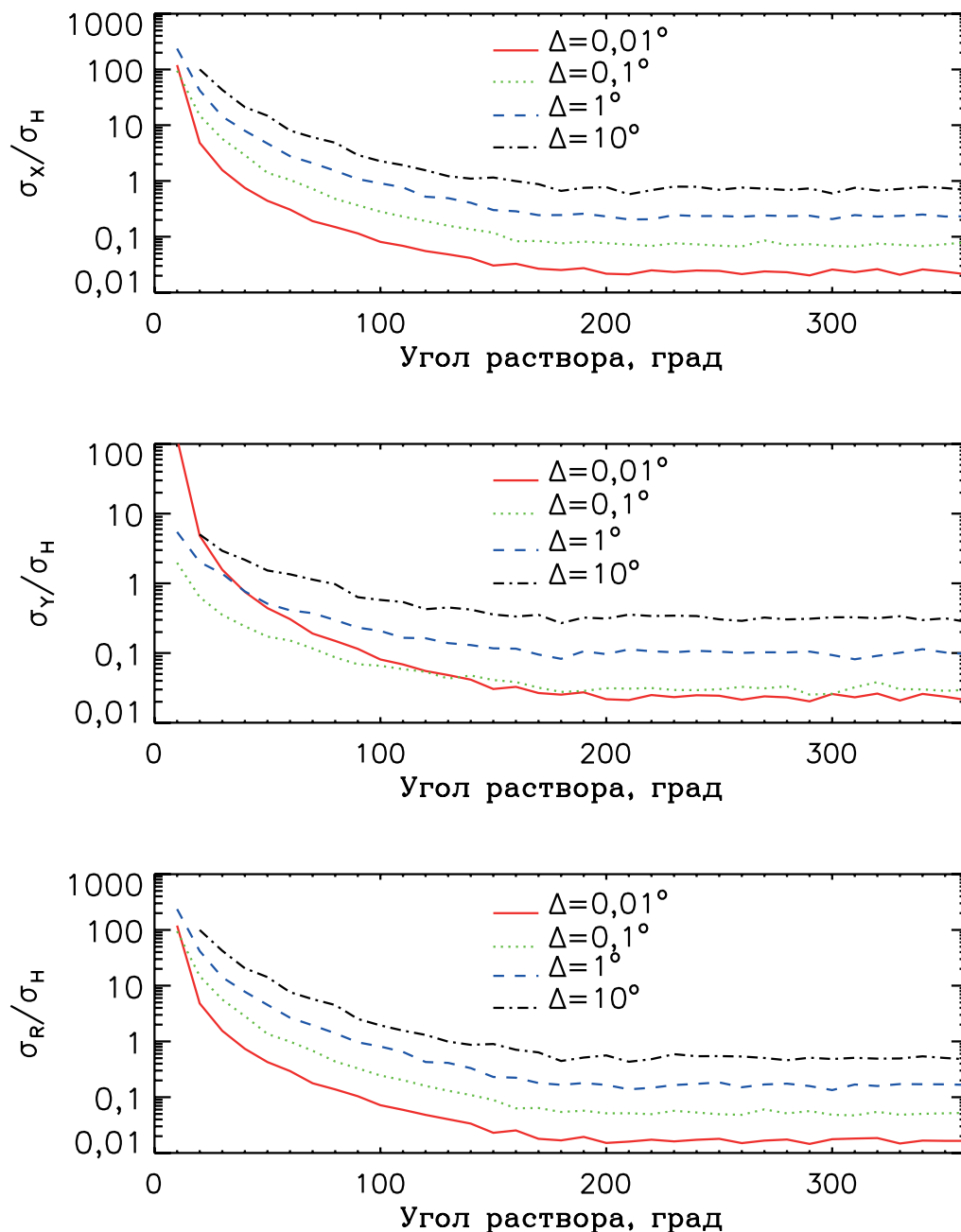


Рис. 6. Среднеквадратические ошибки определения координат центра и радиуса изображения сферического тела в зависимости от угла раствора дуги горизонта φ и интервала независимых измерений Δ по результатам модельных расчетов

Алгоритм обработки изображений

Разработан следующий алгоритм детектирования условного горизонта и оценки направления на центр тела и его размеров, который может быть легко реализован на бортовых процессорах:

1. Фильтрация шума. Поскольку детектирование горизонта проводится по относительно низким уровням яркости, существенно подверженным влиянию шумов, в качестве предварительной операции рекомендуется проводить фильтрацию шума, например, с помощью Гауссова фильтра.

2. Пороговый тест по уровню темного. Этот тест имеет целью нахождение граничных пикселей лимба, значимо превышающих темновой сигнал изображения $THRESH_DARK$. Признак превышения уровня темного проверяется при движении вдоль строк и столбцов изображения по направлениям «сверху вниз», «справа налево», «снизу вверх» и «слева направо», и первая точка X_0 , которая превышает порог $THRESH_DARK$ в данном направлении, проверяется на принадлежность лимбу с помощью следующих тестов (3) и (4).

3. Фильтрация световых помех. Для того, чтобы отличить начало лимба от «дефектного» пиксела, звезды или мелкого светящегося объекта, после нахождения первого пиксела, яркость которого превышает порог $THRESH_DARK$, проверяются $THRESH_STAR$ следующих пикселей. Если хотя бы в одном пикселе значение его яркости меньше $THRESH_DARK$, то точка X_0 считается световой помехой, и поиск в данном направлении продолжается. Этот же тест позволяет исключить из обработки узкие полосы ночного лимба, освещаемые находящимся низко под горизонтом Солнцем, на которых высота условного горизонта может существенно отличаться от получаемой в дневных условиях.

4. Фильтрация края изображения. Если предыдущий тест проходит первая точка по данному направлению, то считается, что горизонт тела по данному направлению находится за границей изображения и его поиск в этом направлении прекращается.

5. Выбор интервала поиска горизонта. Точка горизонта ищется на интервале поиска $[X_0-MB, X_0+MF]$. Число MF точек, следующих за X_0 , выбирается в случае Земли соответствующим или несколько большим, чем высота лимба (~50 км), а число предыдущих точек MB выбирается так, чтобы не пропустить границу лимба при завышенном значении $THRESH_DARK$ (например, $MB = 10$).

6. Нахождение потенциальных точек горизонта с фильтрацией терминатора. На интервале поиска $[X_0-MB, X_0+MF]$ в соответствии с выбранным критерием ($MAXGRAD$ или $MAX/2$) ищется потенциальная точка горизонта и в ней определяется значение вектора градиента яркости. Для этой точки проверяется угол между направлением градиента и проекцией направления падения солнечных лучей на плоскость изображения. Если этот угол меньше 80° , то точка считается потенциальной точкой горизонта, а в противном случае отбрасывается как принадлежащая терминатору.

8. Аппроксимация дуги горизонта окружностью или эллипсом и оценка их характеристик. Аппроксимация найденных точек горизонта окружностью или эллипсом проводится методом наименьших квадратов (Chernov, 2011). При аппроксимации эллипсом направление главных осей эллипса предполагается известным по данным измерения ориентации съемочной системы, что значительно облегчает задачу и повышает точность оценок.

После оценки параметров аппроксимирующей окружности (эллипса) проводится дополнительная фильтрация неверных точек путем отбрасывания точек, отстоящих от указанной окружности (эллипса) на расстояние более двух СКО, и повторной оценки параметров.

Функционирование основных этапов данного алгоритма иллюстрирует *рис. 7* на примере детектирования горизонта на изображении, полученном с ИСЗ GOES-East. Поскольку это изображение было получено при малом фазовом угле, на нем горизонт трудно отличить

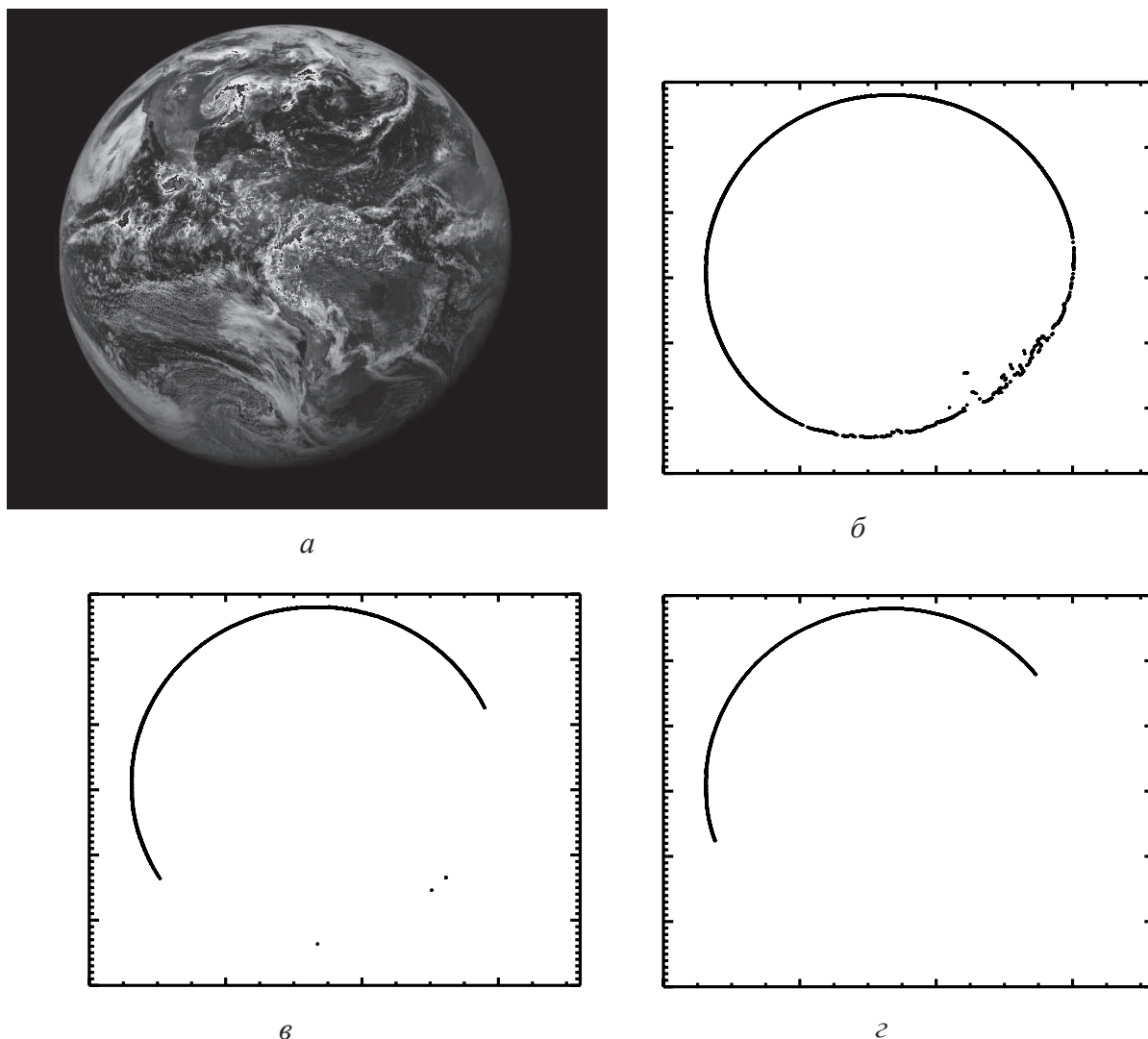


Рис. 7. Иллюстрация работы алгоритма детектирования лимба по снимку с ИСЗ GOES-East: а – исходный снимок, б – точки, выделенные после порогового теста; в – точки, оставшиеся после фильтрации терминатора; г – детектированный условный горизонт

от терминатора только по яркостным признакам. После фильтрации терминатора с использованием градиента яркости на терминаторе остаются отдельные точки, детектированные на краях облаков. Эти точки удаляются после аппроксимации горизонта эллипсом.

Обработка изображений с геостационарного ИСЗ GOES-East

Точность определения положения КА по реальному лимбу Земли оценивалась по снимкам с геостационарного ИСЗ GOES-East. При их обработке учитывалась эллиптичность Земли. Снимки GOES имеют номинальное угловое разрешение (размер пиксела) 28 мрад и размер 14400x12001 пикселов и представлены в геостационарной проекции. Их линейное

разрешение составляет 1 км на поверхности Земли в подспутниковой точке, 1,165 км на лимбе и 1,15 км. в центре видимого диска. Предоставляются изображения, получаемые с интервалом в 3 часа: в 2:45, 5:45, 8:45, 11:45, 14:45, 17:45, 20:45 и 23:45 UTC. Первые два изображения получаются ночью, когда виден лишь узкий серп Земли, а остальные – в дневных условиях. Примеры изображений, полученных в течение одних суток, приведены на *рис. 8*.

В качестве первого шага обработки проводилась геометрическая трансформация изображений путем интерполяции для выравнивания их разрешения в проекции на плоскость видимого диска так, чтобы оно равнялось разрешению в центре диска (1,15 км).

Обрабатывались как исходные снимки, так и изображения, полученные их последовательным заглублением до разрешения ~50 км. Условные горизонты определялись по критерию MAX/2 (результаты, полученные по критерию MAXGRAD, оказались менее стабильными). Раствор дуги детектированного горизонта составлял в дневных условиях около 160° и уменьшался ночью до 90–120° за счет исключения из обработки крайних узких участков лимба.

Рис. 9 иллюстрирует изменение в течение суток координат центра и размера большой полуоси аппроксимирующего эллипса. В оценках координат центра наблюдается выраженный суточный ход. Поскольку он не проявляется в оценках размера большой полуоси, за исключением увеличения разброса в ночные часы, то этот суточный ход, вероятно, вызван ошибками коррекции эффекта изменения ориентации КА в получаемых изображениях.

Средняя высота условного горизонта оказалась равной 19 км, что близко к результатам модельных расчетов для диапазона 0,5–0,7 мкм и критерия MAX/2.

На *рис. 10* показано изменение СКО высоты условного горизонта σ_H , координат центра σ_X и σ_Y и большой полуоси аппроксимирующего эллипса σ_R в зависимости от разрешения на лимбе, рассчитанные по всем обработанным изображениям. Значения σ_X и σ_Y могут быть завышены, поскольку они могут включать указанный нескорректированный суточный ход. Если указанные ошибки рассчитывать относительно размера пиксела (*рис. 10а, в*), то при заглублении разрешения от 1 до 10 км они уменьшаются от 1–3 пикс. до 0,2–0,4 пикс. вследствие уменьшения влияния неопределенности высоты условного горизонта. При дальнейшем заглублении разрешения влияние неопределенности условного горизонта становится незначительным и σ_H изменяется мало, а σ_X , σ_Y и σ_R начинают возрастать вследствие уменьшения числа отсчетов на горизонте. Таким образом, при разрешении до ~10 км ухудшение разрешения частично компенсируется повышением относительной точности измерений. Поэтому, если перейти к измерению ошибок в абсолютной мере – в километрах в плоскости видимого диска, то при 10-кратном ухудшении разрешения указанные ошибки увеличиваются только в 1,5–2,5 раза и не превышают 3 км (*рис. 10б, г*).

С другой стороны, как показывает *рис. 11*, точность оценки всех параметров, кроме высоты горизонта резко ухудшается при уменьшении угла раствора детектированного горизонта. Например, при уменьшении угла раствора в 2 раза – от 160 до 80° σ_X , σ_Y и σ_R увеличиваются в 3–10 раз. Полученные результаты свидетельствуют о том, что при необходимости компромисса между разрешением и полем зрения съемочной системы предпочтение

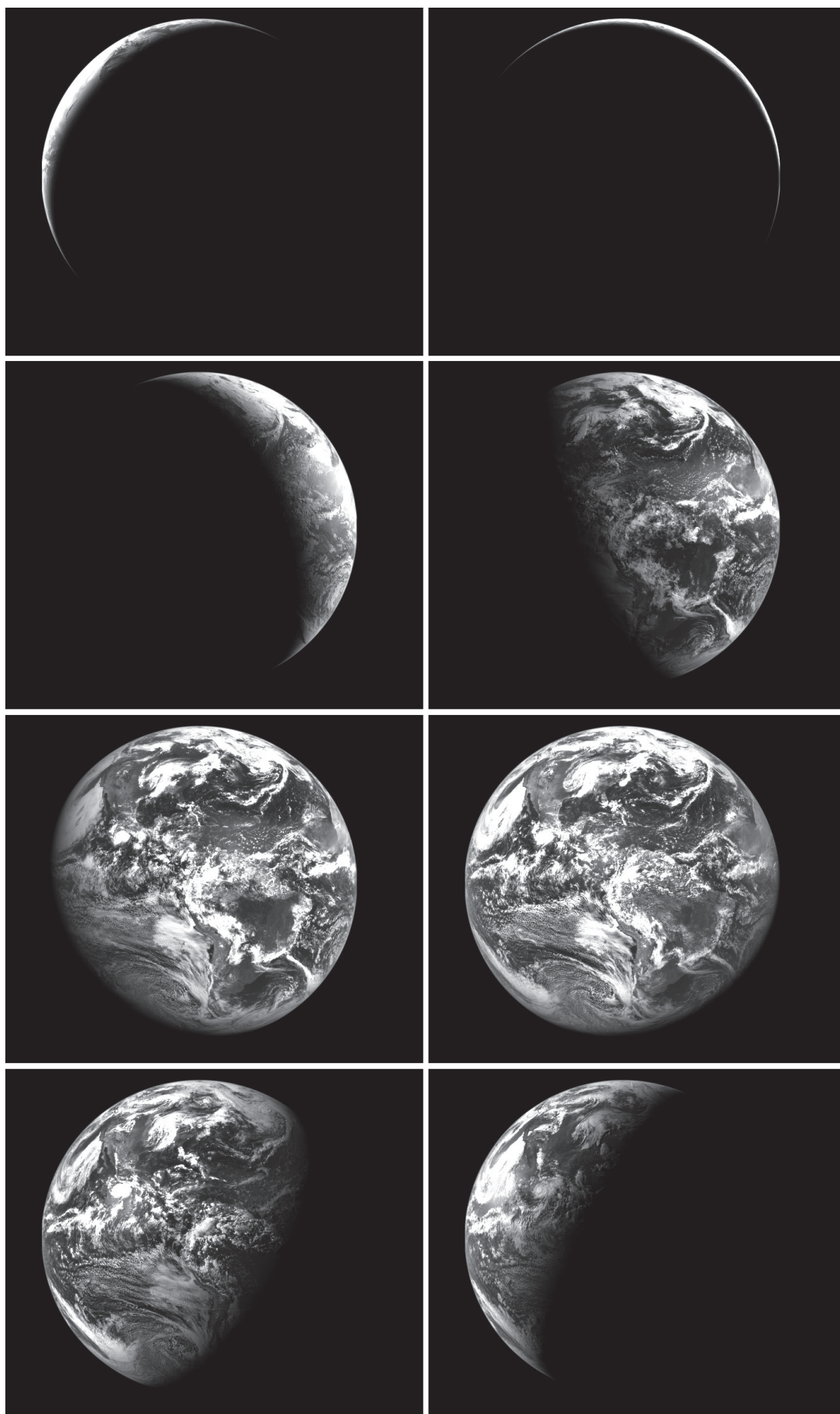


Рис. 8. Снимки GOES-East, полученные 10.06.2014

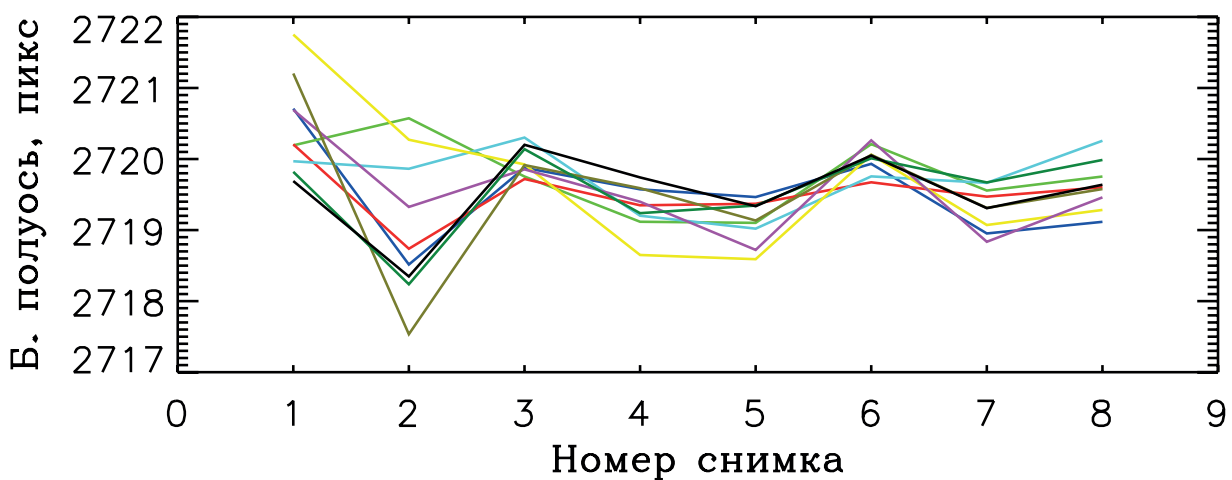
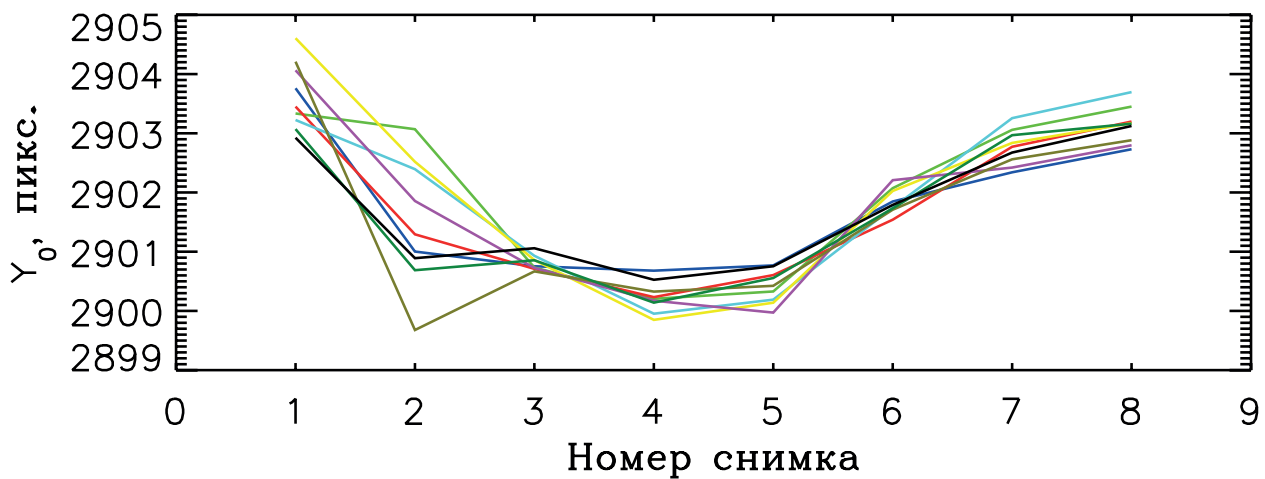
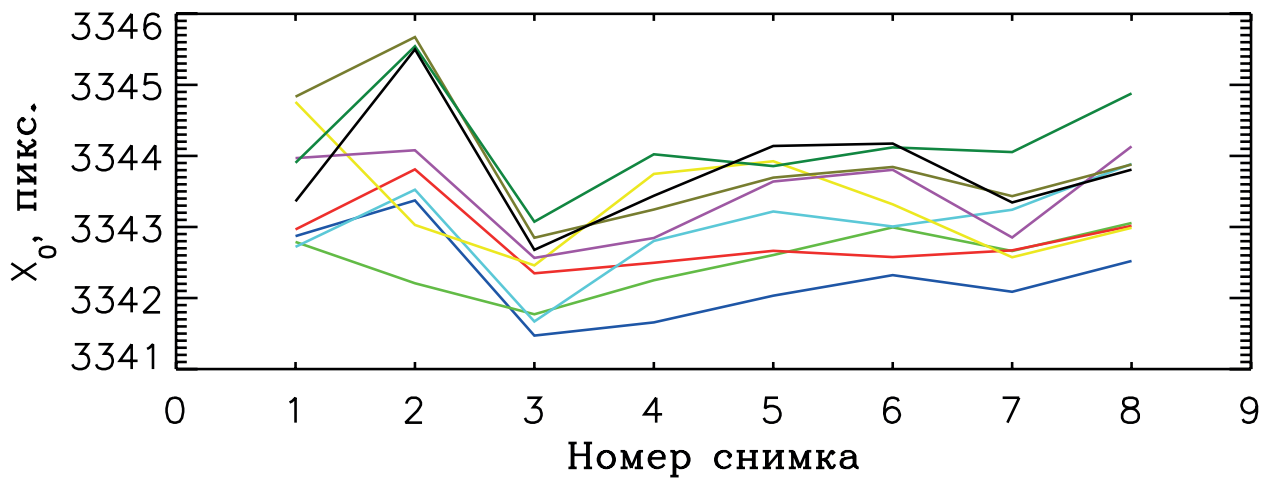


Рис. 9. Суточный ход координат центра X_0 и Y_0 и размера большой полуоси эллипса, аппроксимирующего условный горизонт Земли, на снимках GOES-East за 9 суток наблюдений; в течение суток получается 8 изображений

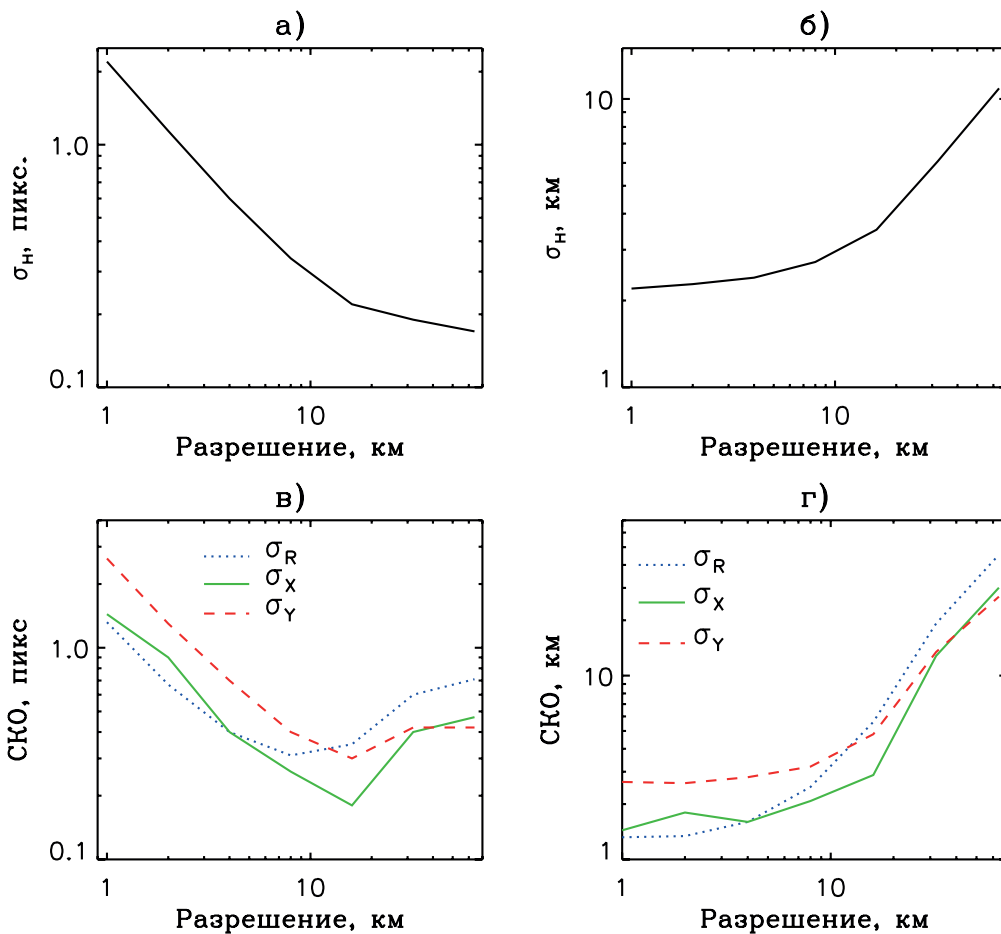


Рис. 10. Среднеквадратические отклонения высоты условного горизонта σ_H , координат центра σ_X и σ_Y и большой полуоси аппроксимирующего эллипс σ_R , выраженные в долях пиксела (слева) и в километрах (справа), в зависимости от разрешения на лимбе

для задач оптической навигации по горизонту следует отдавать увеличению поля зрения даже за счет ухудшения разрешения.

Примем, что указанные ошибки в первом приближении зависят только от линейного разрешения съемочной системы на лимбе. В этом случае зависимостями, приведенными на рис. 10, можно приближенно пользоваться и на других орбитах при том же разрешении на лимбе.

Ошибки σ_X , σ_Y и σ_R непосредственно связаны с ошибками измерения положения КА по наблюдениям горизонта. Ошибки оценки координат КА в тангенциальной плоскости равны σ_X и σ_Y , т.е. 2–3 км при разрешении на лимбе до 10 км.

Ошибка определения расстояния КА от центра Земли σ_L в соответствии с соотношением (1) равна:

$$\sigma_L = \frac{R_0}{\sin \alpha \operatorname{tg} \alpha} \frac{\sigma_R}{L_g} = \frac{\sigma_R}{\sin \alpha} . \quad (2)$$

При разрешении на лимбе до 10 км σ_R не превышает 3 км, что приводит к ошибке определения расстояния КА не более 3–3,5 км на низких орбитах высотой 400–1000 км и не более 20 км на геостационарной орбите.

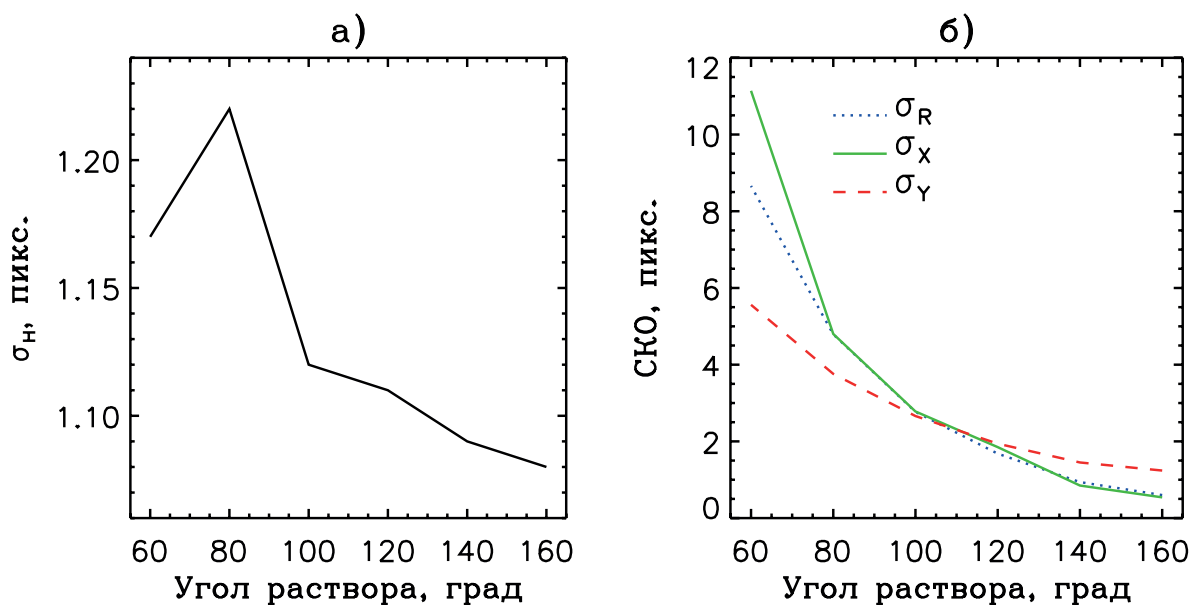


Рис. 11. Среднеквадратические отклонения высоты условного горизонта σ_H , координат центра σ_X и σ_Y и большой полуоси аппроксимирующего эллипсоида σ_R в зависимости от угла раствора дуги детектированного горизонта

Накопление единичных измерений положения КА вдоль орбиты позволяет оценить параметры орбиты со значительно более высокой точностью, чем точность единичного измерения.

Выводы и требования к съемочной аппаратуре

Наибольшая стабильность условного горизонта достигается в диапазоне 0,4–0,48 мкм, где сильное молекулярное рассеяние света маскирует влияния поверхности, облачности и озона на профиль яркости лимба Земли. Однако, этот участок спектра является неподходящим для альтернативного способа оптической навигации по ориентирам на поверхности Земли, например, по береговой линии. В качестве компромисса рекомендуется использование более длинноволновых участков видимого и ближнего ИК диапазона, в которых возможно одновременное применение обоих способов оптической навигации, например, диапазона 0,8–0,9 мкм, где контраст вода-суша максимален.

Обработка изображений с КА GOES-East, полученных в диапазоне 0,5–0,7 мкм, показала, что средняя высота условного горизонта составляет 19 км. Этот результат требует проверки по большему объему экспериментальных данных в различных условиях наблюдения. При разрешении съемочной системы на лимбе от 1 до 10 км ошибка (1σ) единичного измерения высоты условного горизонта, а также оценки положения КА на низких (с высотой до 1000 км) орбитах может составлять 2–3 км по всем трем координатам. Получаемые ошибки в 1,5–2 раза больше ошибок тепловых ИК датчиков горизонта, которые, однако, являются значительно более сложными и дорогими, особенно в варианте наблюдения полного диска Земли.

При навигационных измерениях по горизонту предпочтение следует отдавать увеличению поля зрения съемочной системы, которое в идеале должно захватывать всю Землю. Поскольку при высоте орбиты 400–1000 км угловой размер Земли составляет 120–140°, можно рекомендовать выбор поля зрения съемочной системы ~180°. В качестве вариантов можно предложить построение съемочной системы на основе существующих фотоприемников размером 2000×2000 или 4000×4000 пикс. с объективом, имеющим поле зрения ~180°, что обеспечивает угловое разрешение 6 и 3 угл. мин и линейное разрешение на лимбе 4–6 или 2–3 км соответственно с высоты 400–1000 км.

Датчики горизонта должны устанавливаться на одной платформе со звездными датчиками для определения абсолютной ориентации с точностью, в несколько раз лучшей требуемой точности угловых измерений направления на точки горизонта.

Литература

1. Егошкин Н.А., Еремеев В.В., Козлов Е.П., Москатиньев И.В., Москвитин А.Э. Геодезическая привязка изображений от геостационарных спутников по контуру диска Земли и электронным картам // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2009. Вып. 6. Т. 1. С. 132–138.
2. Тучин М.С., Захаров А.И., Прохоров М.Е. Определение геовертикали по наблюдению лимба Земли // Вторая Всероссийская научно-техническая конференция «Современные проблемы ориентации и навигации космических аппаратов», Россия, Таруса, 13–16 сентября 2010 г. М.: ИКИ РАН. 2011. С. 330–337.
3. Chernov N. Circular and Linear Regression. Fitting Circles and Lines by Least Squares. Monographs on Statistics and Applied Probability 117. CRC Press. 2011.
4. Kaiser J.W., von Savigny C., Eichmann K.-U., Noël S., Bovensmann H., Burrows J.P. Satellite-pointing retrieval from atmospheric limb-scattering of solar UV-B radiation // Can. J. Phys. 2004. Vol.82. P. 1041–1052.

Potential of Earth limb navigation measurements in the visible and near-IR spectral range

B.S. Zhukov, S.B. Zhukov, A.A. Forsh

*Space Research Institute of Russian Academy of Sciences
E-mails: bzhukov@iki.rssi.ru, forsh@ofo.iki.rssi.ru*

Horizon sensors can be used both for s/c attitude and position determination. Autonomous horizon navigation can be utilized to back-up the GLONASS/GPS systems in Earth orbits and to substitute them in orbits around other bodies of the Solar system. Present-day space-borne horizon sensors work mostly in the thermal IR spectral range. Horizon sensors of the visible and near infrared spectral range (VNIR: 0.4–1 μm) could be significantly simpler and cheaper. The Earth horizon is not visible from space in the VNIR spectral range due to large atmospheric optical thickness and is often covered by clouds. Therefore a stable definition of a conventional horizon on the Earth limb is required. MODTRAN atmospheric transfer simulations as well as processing of GOES-East images suggest a possible definition of the conventional horizon in the VNIR as the altitude of the half-maximal radiance of the limb. Though the conventional horizon is most stable in the blue spectral range, utilization of longer wavelength VNIR parts may be desirable, allowing simultaneous navigation by landmarks. The key parameter of space-borne horizon sensors, which has the strongest effect on s/c position estimation accuracy, is their field of view that should be selected as large as possible, ideally covering the whole Earth, even at the expense of resolution. The mean altitude of the conventional horizon in the 0.5–0.7 μm spectral range was found to be equal to 19 km. The error (1σ) of VNIR horizon sensors in horizon altitude as well as in s/c position measurement in orbits below 1000 km was estimated as 2–3 km when the sensor resolution at the limb is in the range of 1 to 10 km. The altitude error in geostationary orbits increases to 20 km. Measurement accumulation along the orbit can provide a significantly better orbit determination accuracy.

Keywords: autonomous space navigation, horizon navigation, horizon sensors, Earth limb, conventional horizon

References

1. Egoshkin N.A., Ereemeev V.V., Kozlov E.P., Moskatinyev I.V., Moskvitin A.E. Geodezicheskaya privyazka izobrazhenii ot geostatsionarnykh sputnikov po konturu diska Zemli i elektronnykh kartam (Geodetic binding of images from the geostationary satellite on a contour of a disk of the Earth and electronic maps), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2009, Issue 6, Vol. 1, pp. 132–138.
2. Tuchin M.S., Zakharov A.I., Prokhorov M.E. Opredelenie geovertikali po nablyudeniyu limba Zemli (Geovetical determination from observations of Earth's limb), *Vtoraya Vserossiiskaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya "Sovremennye problemy orientatsii i navigatsii kosmicheskikh apparatov"* (Proc. 2nd All-Russian Scientific and Technological Conference "Contemporary Problems of Spacecraft Attitude Determination and Control"), Russia, Tarusa, 13–16 September, 2010, Moscow: IKI RAN, 2011, pp. 330–337.
3. Chernov N. *Circular and Linear Regression. Fitting Circles and Lines by Least Squares*, Monographs on Statistics and Applied Probability 117, CRC Press. 2011.
4. Kaiser J.W., von Savigny C., Eichmann K.-U., Noël S., Bovensmann H., Burrows J.P. Satellite-pointing retrieval from atmospheric limb-scattering of solar UV-B radiation, *Can. J. Phys.*, 2004, Vol.82, pp. 1041–1052.