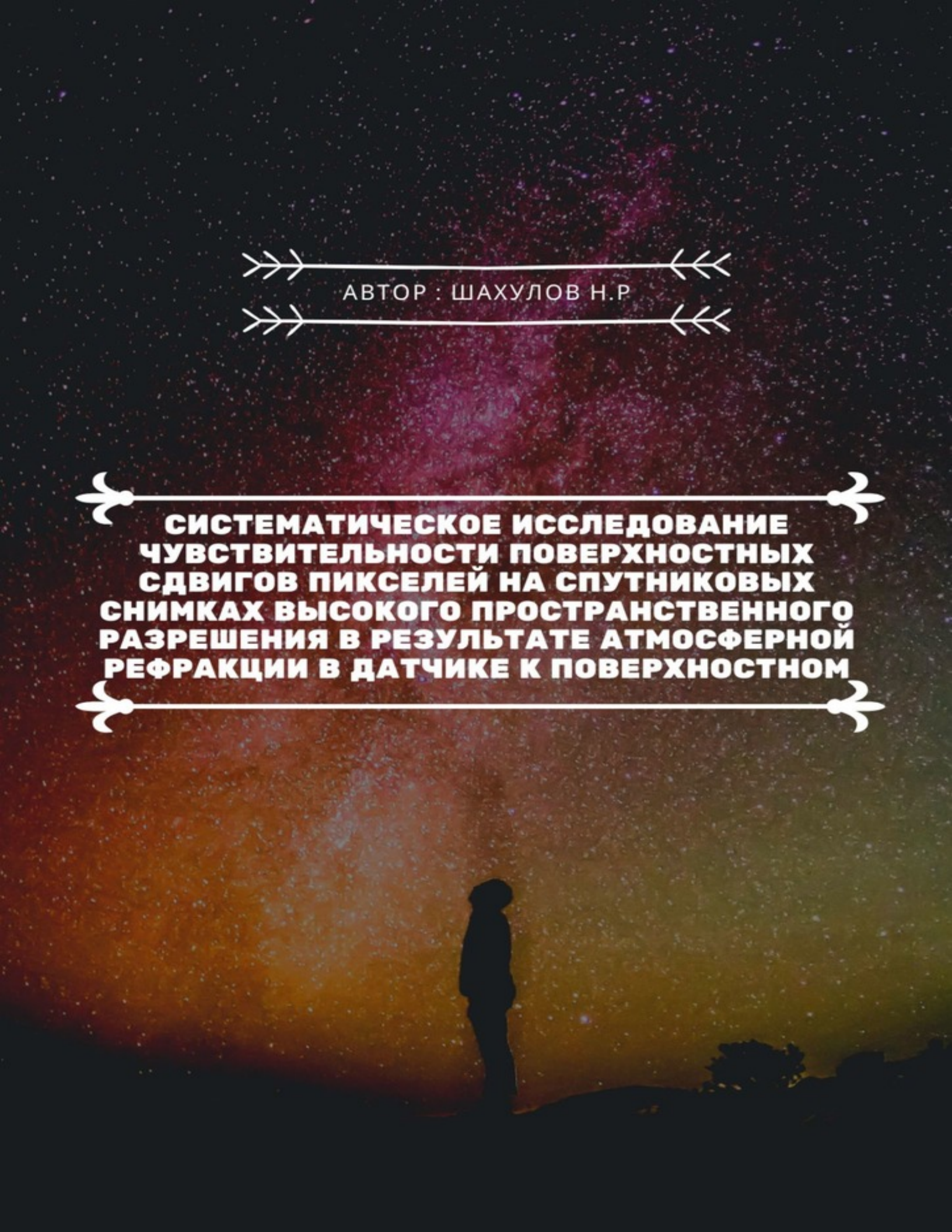
АВТОР : ШАХУЛОВ Н.Р

СИСТЕМАТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ПОВЕРХНОСТНЫХ СДВИГОВ ПИКСЕЛЕЙ НА СПУТНИКОВЫХ СНИМКАХ ВЫСОКОГО ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАЗРЕШЕНИЯ В РЕЗУЛЬТАТЕ АТМОСФЕРНОЙ РЕФРАКЦИИ В ДАТЧИКЕ К ПОВЕРХНОСТНОМ



Никита Шахулов

Систематическое исследование чувствительности поверхностных сдвигов пикселей на спутниковых снимках высокого пространственного разрешения

В результате атмосферной рефракции в датчике к поверхностному пути лучей

Шрифты предоставлены компанией «ПараТайп»

© Никита Шахулов, 2021

При наблюдении земной поверхности с низкоорбитальной спутниковой платформы (НОО) с оптическим датчиком на восходящий путь распространения света от земли к спутнику влияет атмосферная рефракция.

12+

ISBN 978-5-0053-3738-2
Создано в интеллектуальной издательской системе Ridero

ОГЛАВЛЕНИЕ

Систематическое исследование чувствительности поверхностных сдвигов пикселей на спутниковых снимках высокого пространственного разрешения
1. Вступление
2. Методы
3. Результаты
4. Обсуждение
5. Резюме

Систематическое исследование чувствительности поверхностных сдвигов пикселей на спутниковых снимках высокого пространственного разрешения В результате атмосферной рефракции в датчике к поверхностному пути лучей.

Систематическое исследование чувствительности поверхностных сдвигов пикселей на спутниковых снимках высокого пространственного разрешения В результате атмосферной рефракции в датчике к поверхностному пути лучей.

При наблюдении земной поверхности с низкоорбитальной спутниковой платформы (НОО) с оптическим датчиком на восходящий путь распространения света от земли к спутнику влияет атмосферная рефракция. Для датчиков изображения с пространственным разрешением около одного километра на земле атмосферной рефракцией обычно пренебрегают при георегистрации спутниковых изображений. Однако для систем визуализации с высоким пространственным разрешением с размерами поверхностных пикселей около одного метра или более, пренебрежение атмосферными эффектами рефракции, как правило, может привести к ошибкам в несколько метров в пространственно зарегистрированных изображениях. Эффекты атмосферной рефракции необходимо должным образом учитывать при пространственной регистрации спутниковых изображений высокого пространственного разрешения. Я обнаружил, что с незначительными изменениями модели трассировки лучей, реализованные в серии кодов переноса атмосферного излучения LOWTRAN, разработанных в 1970-х и 1980-х годах, в частности LOWTRAN7 в конце 1980-х годов, могут быть использованы для моделирования смещения пикселей в результате атмосферной рефракции для спутниковых наблюдений. Модели серии LOWTRAN первоначально были разработаны для расчета атмосферных пропусканий и излучений для излучения, проходящего через

длинные пути земной атмосферы. На участках трассировки лучей кодов сферическая модельная атмосфера от земли до 100 км тонко разделена примерно на 30 тонких атмосферных слоев. Точно рассчитаны углы преломления для траекторий лучей между последовательными границами слоев. Я по-новому использую углы преломления, рассчитанные по коду LOWTRAN7, для изучения сдвига пикселей поверхности, возникающего в результате атмосферной рефракции, для спутниковых наблюдений. В этом письме я сообщаю о результатах моделирования смещений поверхностных пикселей для различных высот спутника и зенитных углов обзора вниз, нескольких профилей атмосферной температуры и давления, нескольких высот поверхности и зависимостей длин волн от синего (450 нм) до ближнего ИК-диапазона (865 нм). Эти результаты могут иметь опорные значения для исследователей, чтобы оценить вызванные рефракцией смещения пикселей на их спутниковых снимках с высоким пространственным разрешением. Полученные результаты могут также потенциально помочь в разработке алгоритмов космических аппаратов для точного наведения приборов и задания задач полета для автоматического захвата кратковременных научных событий.

1. ВСТУПЛЕНИЕ

В настоящее время дистанционные наблюдения Земли в глобальном масштабе осуществляются с помощью приборов NASA Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) [1,2] и Visible Infrared Imaging Spectroradiometer Suite (VIIRS) [3] с полярных орбитальных спутниковых платформ. Восходящие пути лучей от поверхности к спутникам подвержены влиянию атмосферных эффектов преломления. Чтобы выяснить, следует ли учитывать эффект преломления для точной геолокации данных изображений MODIS и VIIRS, Ноердлингер [4] разработал аналитический метод, определяющий угол атмосферной рефракции и кажущееся смещение точки пересечения Земли из-за атмосферной рефракции. В методе Ноердлингера предполагается однослойная и сферически симметричная модельная атмосфера. Преобразование угла изгиба в горизонтальное смещение пикселя производится приблизительно путем принятия высоты шкалы для тропосферы. Результаты моделирования Ноердлингера показывают, что при зенитном угле около 45 градусов и средней высоте тропосферного масштаба 10,5 км пиксель на спутниковом изображении на уровне моря будет смещен примерно на 5 м, что намного меньше размеров пикселей около одного км для некоторых полос MODIS и 750 м для некоторых полос VIIRS. В результате в настоящих геолокационных продуктах MODIS и VIIRS эффектами атмосферной рефракции пренебрегают.

В последние годы спутниковые снимки высокого пространственного разрешения с пространственным разрешением ~1 м и более становятся все более доступными для общественного

пользования. Точная геолокация изображений с высоким пространственным разрешением требует четкого учета атмосферных эффектов. Обзор изгиба и задержки распространения атмосферных преломляющих электромагнитных волн был дан Мангумом и Уоллесом [5]. Они предположили, что для точного расчета преломляющего изгиба требуется двухслойная модель атмосферы (слой стратосферы поверх слоя тропосферы). Ян и др. [6] сообщили о методе коррекции ошибки геолокации, возникающей в результате атмосферной рефракции, для оптических спутниковых изображений высокого разрешения. Они использовали упрощенную двухслойную модель атмосферы, включающую тропосферу плюс стратосферу, для расчета преломляющих изгибающих эффектов. Их расчетное полное смещение пикселей поверхности является результатом сочетания тропосферного изгиба и стратосферного изгиба. Упомянутая выше работа по моделированию атмосферных эффектов преломления и изгиба исходит от исследовательских сообществ астрономии и спутниковой геодезии.

С начала 1970-х годов в сообществе атмосферных наук разрабатывается ряд алгоритмов трассировки лучей, предполагающих многослойную сферически симметричную модель атмосферы (~30 слоев) с преломлением [7,8,9]. Алгоритмы используются в основном для точного расчета длины пути солнечных лучей в каждом слое атмосферы для света, достигающего земли, высотных аэростатов [10,11] или спутниковых приборов [12] в условиях низкого угла наклона солнца. Рассчитанные длины траекторий в многослойной модельной атмосфере затем используются для преобразования полученных количеств следовых атмосферных газов в длинных наклонных траекториях из измеренных спектров инфракрасного пропускания в эквивалентные количества газов в вертикальных траекториях от земли до космоса [12].

Разработка «Компьютерной программы Airmass для расчета атмосферного пропускания/излучения: FSCATM» в 1983 году [9] ознаменовала зрелость разработки алгоритма трассировки лучей в сообществе атмосферных наук. Алгоритм трассировки лучей FSCATM с незначительными улучшениями был включен в ряд алгоритмов моделирования атмосферы, таких как LOWTRAN6 [13], LOWTRAN7 [14] и MODTRAN [15]. Он позволяет задать несколько вариантов геометрии наклонной траектории, включая траекторию между высотой спутника (H1) и высотой земной поверхности (H2). На основе нашего тщательного изучения общедоступного исходного кода компьютера LOWTRAN7 я обнаружил, что углы преломления для траекторий лучей между последовательными границами атмосферного слоя точно рассчитаны, но эти углы не записаны в промежуточных печатных файлах с достаточным количеством полезных цифр. Я по-новому использую код LOWTRAN7 для расчета углов преломления для изучения сдвига поверхностных пикселей в результате атмосферной рефракции для спутниковых наблюдений. В этом письме я сообщаю о результатах моделирования смещений поверхностных пикселей для различных высот спутника и зенитных углов обзора вниз, нескольких профилей атмосферной температуры и давления, нескольких высот поверхности и зависимостей длин волн от синего (450 нм) до ближнего ИК-диапазона (865 нм).

2. МЕТОДЫ

Алгоритм многослойной трассировки атмосферных лучей, используемый в этом исследовании, был хорошо описан ранее в нескольких научных докладах [9,13,14]. Ниже я суммирую основные моменты алгоритма трассировки лучей, реализованного внутри LOWTRAN7.

В LOWTRAN7 имеется в общей сложности 6 встроенных модельных атмосфер, которые соответствуют американскому стандарту (1976), тропическим, среднеширотным летним, среднеширотным зимним, субарктическим летним и субарктическим зимним моделям. Для каждой модельной атмосферы вертикальные профили высоты, давления, температуры и плотности водяного пара сводятся в таблицу с шагом 1 км от 0 до 25 км, с шагом 5 км от 25 до 50 км, а затем с шагом 70 км и 100 км. Последний уровень высоты указан на уровне 99 999 км, что соответствует геометрии наблюдения спутника над атмосферой. LOWTRAN7 также позволяет пользователям вводить свои собственные модельные атмосферы.

Рисунок 1 представляет собой диаграмму, иллюстрирующую геометрию обзора поверхности спутника вниз. Сплошной черный круг представляет собой сферическую Землю с радиусом Re. Пунктирная окружность представляет собой верхнюю часть земной атмосферы (TOA) с радиусом Re плюс 100-километровая толщина модельной атмосферы. Предположим, что два спутниковых датчика, расположенных на S1 и S2 с S1> S2, но с тем же самым спутником, наблюдающим зенитный угол θ, смотрят на поверхность Земли. Точки пересечения в TOA-это A1 и A2 соответственно. Локальные

зенитные углы обзора вверх в точках A1 и A2 равны θ1 и θ2 соответственно, но с θ1> θ2 из-за кривизны Земли. Путь луча от S1 к поверхности Земли будет иметь большее преломляющее смещение, чем путь от S2 к поверхности из-за большего локального угла падения в точке A1. Геометрия пути преломления лучей также была проиллюстрирована во многих других работах и докладах, таких как работы Ноердлингера [4], Яна и др. [6], и Kneizys et al. [13]. Эти иллюстрации, как правило, не отражают в явном виде тот тонкий момент, что величина смещения пикселя поверхности в результате атмосферной рефракции зависит от высоты спутника.

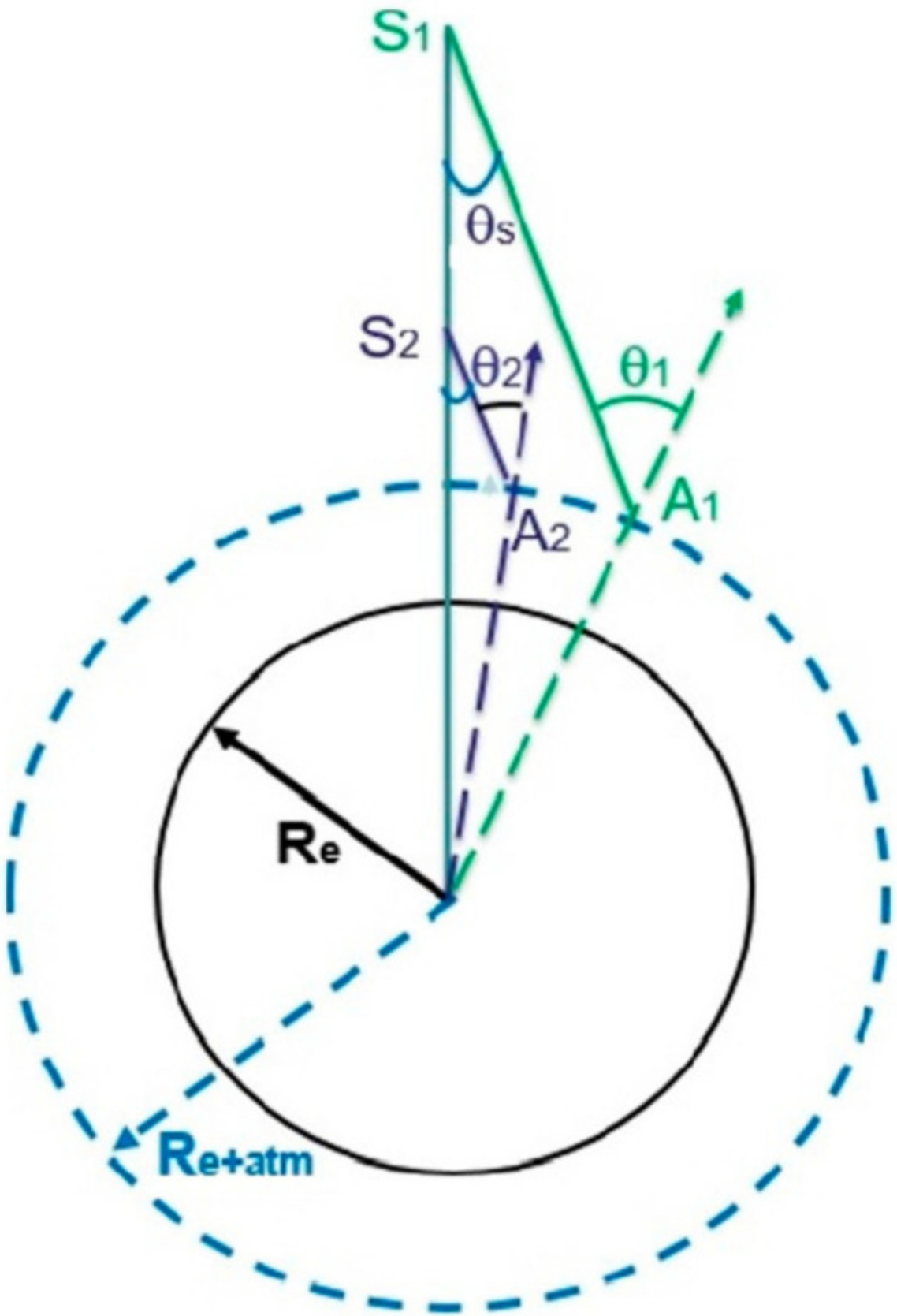

S1
θs
S2
θ2
θ1
A1
A2
Re
Re+atm

Рисунок 1.

Диаграмма, иллюстрирующая геометрию обзора поверхности спутника. Следует отметить, что для спутников на разных высотах с одинаковым зенитным углом обзора вниз зенитные углы обзора в верхней части атмосферы различны.

После того как путь луча достигает вершины модельной атмосферы на расстоянии 100 км, путь преломленного луча в атмосфере прослеживается слой за слоем в соответствии с законом Снелла [9,16].

$n_i (R_e + Z_i) \sin(\theta_i) = \text{constant}$

где ni-показатель преломления воздуха для i-го уровня модельной атмосферы, Re — радиус Земли, Zi — высота уровня над землей, θi-локальный зенитный угол для i-го уровня [14].

Показатель преломления воздуха из Edlen [17] используется в LOWTRAN 7. Формулировка дается следующим образом:

$$(n - 1) \times 10^6 = \{a_0 + a_1/[1 - (\nu/b_1)^2] + a_2/[1 - (\nu/b_2)^2]\} \times (P - P_w)/P_0 \times 296.15/T + [c_0 - (\nu/c_1)^2] \times P_w/P_0$$

где ν-волновое число в см−1, P-полное давление в мб, Pw-парциальное давление водяного пара, P0 равно 1013,25 мб, T-температура в K, а константы a, в и с следующие:

$a_0 = 83.43$, $a_1 = 185.08$, $a_2 = 4.11$
$b_1 = 1.14 \times 10^5$, $b_2 = 6.24 \times 10^4$
$c_0 = 43.49$, $c_1 = 1.7 \times 10^4$

LOWTRAN7 предполагает сферически симметричную атмосферу с экспоненциальными профилями плотности и показателем преломления между границами слоев. Такая схема реализации позволяет проводить точные расчеты пути преломления лучей для различных геометрий обзора [9,14].

В LOWTRAN7 есть три типа встроенных геометрий просмотра. Тип 2 допускает определение наклонной или вертикальной траектории между двумя высотами. Я использовал эту опцию, указав путь между высотой спутника (H1) с зенитным углом обзора спутника вниз (θs) и высотой земной поверхности (H2). Тщательно изучив общедоступный исходный код компьютера LOWTRAN7 и образцы входных и выходных файлов, я обнаружил, что углы преломления изгиба для траекторий лучей между последовательными границами слоев точно рассчитаны, но эти углы не записываются в промежуточные печатные файлы с достаточным количеством полезных цифр. Я внес незначительные изменения в исходный код LOWTRAN7, чтобы правильно выводить преломляющие углы изгиба. Используя послойные углы изгиба, зенитные углы обзора и высоты слоев над землей, поверхностные смещения пикселей для всех атмосферных слоев рассчитываются по формуле, используемой Yan et al. [6]. Суммирование смещений, возникающих в 32 слоях модельной атмосферы, дает полное смещение преломляющей поверхности от спутника к земле.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

Я провел обширные расчеты смещений пикселей преломляющей поверхности с использованием модифицированной версии кода LOWTRAN7 для синего (450 нм), зеленого (550 нм), красного (650 нм) и ближнего ИК — (NIR) (860 нм) каналов с узкой шириной 10 нм, высотами спутников 300, 400, 500, 600, 700, и 800 км, зенитные углы обзора со спутника вниз от 5 до 80 градусов, три модельные атмосферы (стандартные, тропические и субарктические зимние модели 1976 года) и пять высот поверхности на 0, 1, 2, 3 и 4 км. Примерные результаты расчета представлены ниже.

3.1. Высота атмосферы в зависимости от Угла изгиба Слоистого Зеленого света и Кумулятивного сдвига на поверхности

На рис. 2A показан примерный график высоты атмосферы в зависимости от угла изгиба слоистого зеленого света. График рассчитан для высоты спутника 500 км, зенитного угла обзора спутника вниз 45 градусов, стандартной модели атмосферы США 1976 года и высоты поверхности 0 км. На более низких высотах ниже 5 км углы изгиба слоев относительно велики по сравнению с углами изгиба в диапазоне высот 10—15 км. Угол изгиба на 30 км внезапно подскакивает вверх, потому что толщина модельной атмосферы увеличивается до 5 км, а не до 1 км для слоев ниже 25 км.

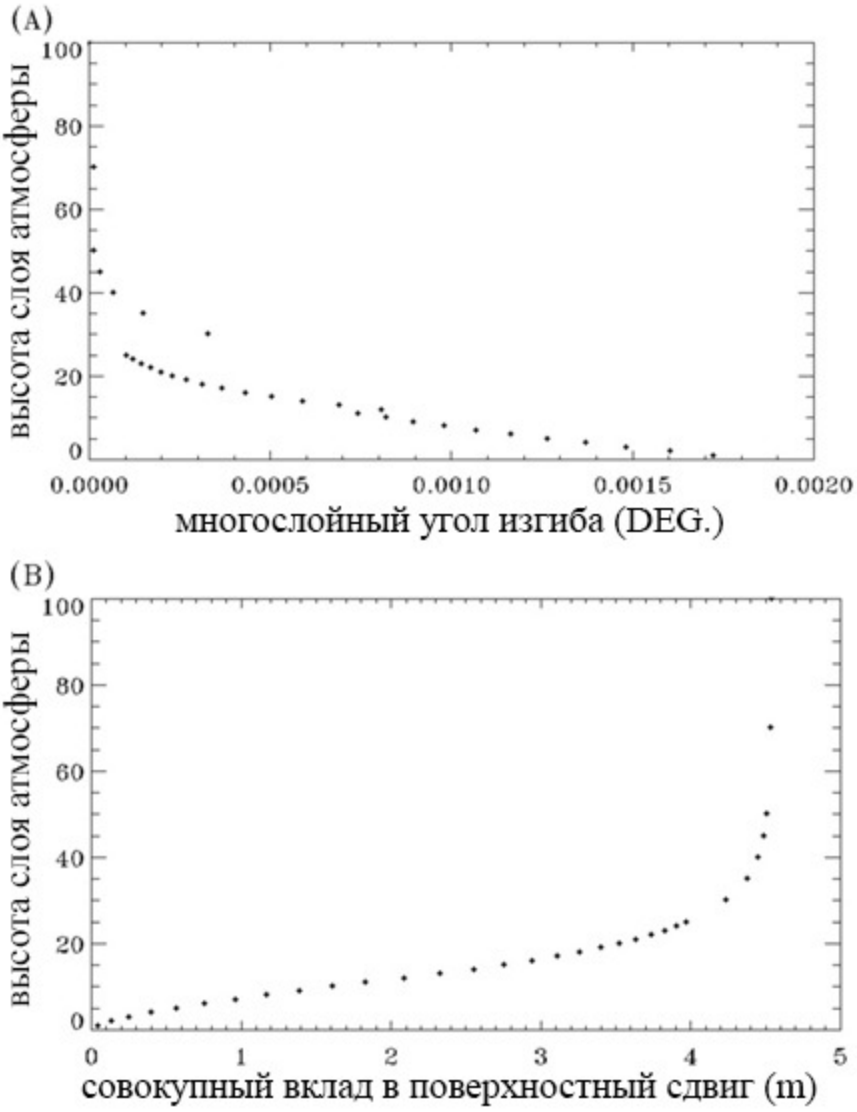


Рисунок 2.

Послойные углы преломления атмосферы и Б) кумулятивный сдвиг пикселей на поверхности для зеленого света (550 нм) для модельной атмосферы США 1976 года, высота спутника 500 км и зенитный угол обзора вниз 45 градусов.

На рис. 2Б показан соответствующий график для высоты атмосферы в зависимости от кумулятивного вклада в сдвиг поверхности. Общий сдвиг поверхности в этом случае для траектории луча спутника к поверхности рассчитывается как 4,54 м.

Атмосфера ниже 30 км вносит примерно 93% в общий сдвиг поверхности. Сравнивая рис. 2B с рисунком 2A, видно, что, хотя углы изгиба слоев в диапазоне высот 0—5 км больше, чем в диапазоне высот 10—15 км, вклады в сдвиг поверхности из диапазона высот 0—5 км меньше, чем из диапазона высот 10—15 км. Причина в том, что если два слоя имеют одинаковый угол изгиба, то чем выше высота слоя, тем больше вклад в сдвиг поверхности.

В целях валидации я сравнил рассчитанный полный сдвиг со сдвигом, сообщенным Ноердлингером [4] для очень сходных геометрий наблюдений. Наш общий сдвиг для высоты спутника 700 км и зенитного угла обзора вниз 45 градусов составляет 5,13 м (для всех 32 тонко разделенных слоев атмосферы от земли до 100 км). Сдвиг, о котором сообщает Noerdlinger [4], с предположением, что расчет был фактически сделан для высоты MODIS 705 км и для однослойной модельной атмосферы, составляет 5,46 м. Для зенитного угла обзора спутника вниз 50 градусов сдвиги от моделирования LOWTRAN7 и от Noerdlinger [4] составляют 7,70 м и 7,73 м соответственно. Для зенитного угла обзора спутника вниз 55 градусов (край линии сканирования MODIS) сдвиг от LOWTRAN7 и от Noerdlinger [4] составляет 13,14 м и 11,40 м соответственно. В целом результаты моделирования LOWTRAN7 довольно хорошо согласуются с результатами Noerdlinger [4].

3.2. Зависимость сдвигов преломляющей поверхности от зенитных углов обзора датчика и высот спутника

На рис. 3 показаны шесть кривых смещения пикселей преломляющей поверхности в зависимости от зенитных углов обзора спутника вниз для высот спутника 800, 700, 600, 500, 400, и 300 км. Расчеты сделаны для зеленого света при 550 нм для стандартной модели атмосферы США 1976 года и высоты поверхности 0 км. Из этих кривых видно, что смещение пикселей преломляющей поверхности составляет приблизительно 1 м для

зенитного угла обзора спутника вниз на 20 градусов, независимо от высоты спутника. Однако для зенитных углов обзора спутника вниз, превышающих примерно 40 градусов, чем выше высота спутника, тем больше смещение пикселей преломляющей поверхности. Ниже приведены два конкретных примера. Для спутника на расстоянии 300 км с нисходящим зенитным углом обзора 60 градусов рефракционный сдвиг на поверхности составляет 12,53 м. С другой стороны, для спутника на расстоянии 800 км с тем же зенитным углом обзора рефракционный сдвиг увеличивается до 48,83 м. Увеличение рефракционного сдвига на поверхности с ростом высоты спутника и зенитного угла обзора спутника в основном связано с эффектом кривизны Земли. При большей высоте спутника и большем зенитном угле обзора спутника вниз траектория луча между спутником и верхней частью атмосферы (TOA) (100 км) имеет больший локальный зенитный угол обзора в TOA (см. рис. 1), а последующий путь луча от TOA к поверхности Земли подвергается большему атмосферному преломляющему изгибу. Кривые на рис. 3 могут иметь опорные значения для разработчиков спутниковых алгоритмов, чтобы решить, следует ли учитывать атмосферные рефракционные эффекты при разработке алгоритмов космического аппарата для точного наведения и задания задач полета доступных изображений высокого пространственного разрешения с размерами пикселей поверхности порядка 1 м или более тонких, чтобы можно было автоматически фиксировать кратковременные маломасштабные научные события.

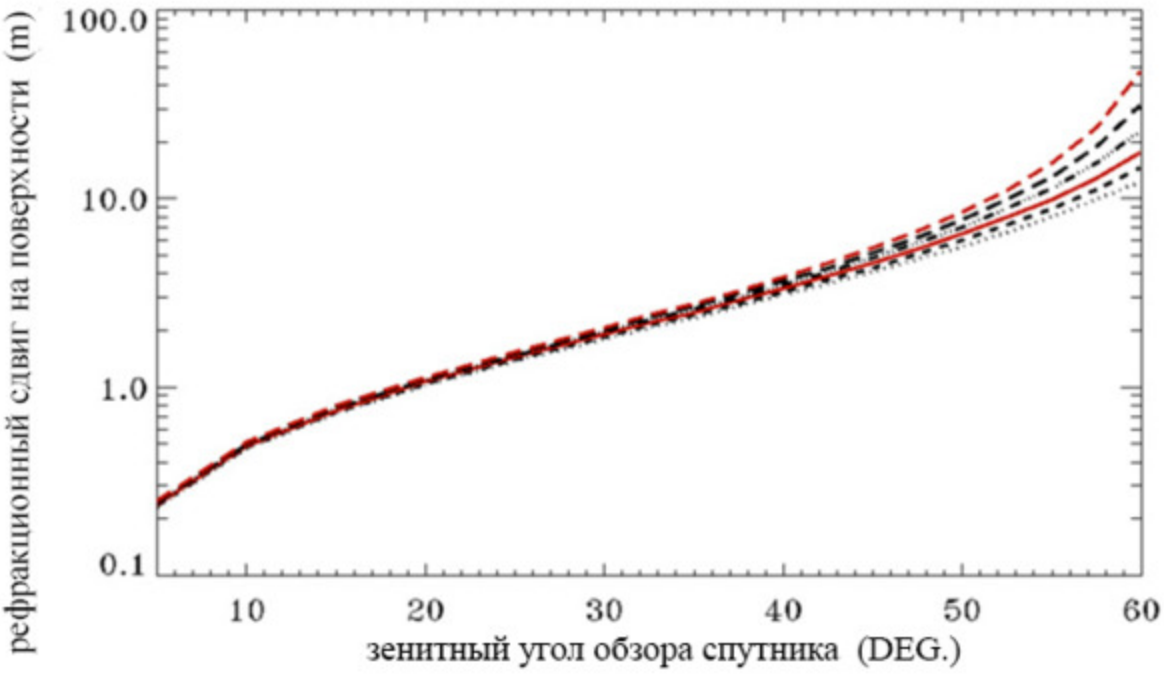


Рисунок 3.

Кривые сверху вниз — смещение пикселей преломляющей поверхности в зависимости от зенитных углов обзора спутника вниз для высот спутника 800, 700, 600, 500, 400, и 300 км, соответственно, для зеленого света (550 нм) и атмосферы модели США 1976 года.

3.3. Зависимость сдвигов преломления от модельных атмосфер

Согласно уравнению (2), показатели преломления воздуха зависят от температуры, давления и парциального давления водяного пара в атмосфере. На рис. 4 я показываю смещение пикселя поверхности в зависимости от угла обзора спутника вниз для трех модельных атмосфер: субарктической зимы, стандарта США 1976 года и тропической модели. Субарктическая зимняя модельная атмосфера представляет собой очень плотные и сухие атмосферные условия. Стандартная модель атмосферы США 1976 года представляет средние атмосферные условия, в то время как

тропическая модель атмосферы представляет жаркие и влажные тропические летние условия. Кроме того, три кривые на рис. 4 рассчитаны для зеленого света при 550 нм, высоте спутника 500 км и высоте поверхности 0 км. Для спутникового обзора вниз зенитные углы ниже 60 градусов, три кривые не имеют большого разделения. При зенитном угле обзора спутника вниз 60 градусов смещение пикселя поверхности для субарктической зимы, США 1976 года, и тропической модельной атмосферы составляет 18,51, 17,79 и 17,48 м соответственно. Это указывает на то, что поверхностные сдвиги пикселей, возникающие в результате преломляющего изгиба, очень слабо зависят от атмосферных моделей. В результате разработчикам спутниковых алгоритмов, возможно, не придется подробно учитывать атмосферные условия при разработке алгоритмов наведения космических аппаратов на зенитные углы обзора спутника вниз менее 60 градусов. При зенитном угле обзора спутника вниз в 65 градусов смещение пикселя поверхности для тех же трех модельных атмосфер составляет 55,68, 50,12 и 47,64 м соответственно. Поэтому для достижения точности наведения около 1 м разработчикам спутниковых алгоритмов может потребоваться детальное рассмотрение атмосферных условий при углах обзора спутника вниз, превышающих около 60 градусов.

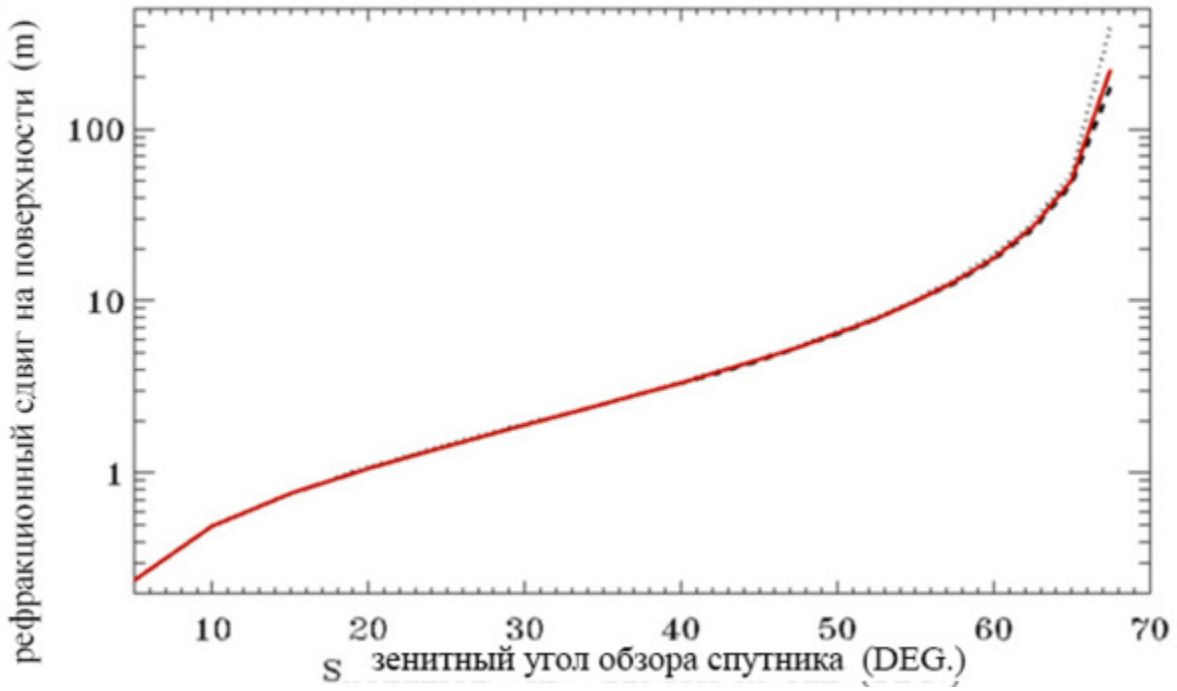


Рисунок 4.

Кривые сверху вниз — смещение пикселей преломляющей поверхности в зависимости от углов обзора спутника вниз для субарктической зимы, стандарта США 1976 года и тропических моделей соответственно. Расчеты сделаны для зеленого света при 550 нм и высоте спутника 500 км.

3.4. Зависимость сдвигов преломления от длины волны

В уравнении (2) волновое число ν равно обратной длине волны (λ), то есть $\nu = 1/\lambda$. Поэтому показатели преломления воздуха зависят от длины волны. На рис. 5 показаны сдвиги поверхностных пикселей в зависимости от длины волны для трех модельных атмосфер. Расчеты выполнены для высоты спутника 500 км и большого зенитного угла обзора спутника вниз 60 градусов. Для каждой из кривых на рис. 5 зависимость сдвига пикселя поверхности от длины волны довольно мала. Сравнивая кривую для субарктической зимней модели с кривой для тропической модели,

видно, что более высокое поверхностное давление субарктической зимней модели вносит примерно на 1 м больший рефракционный сдвиг для большого зенитного угла обзора 60 градусов и для синего, зеленого, красного и NIR-диапазона огней.

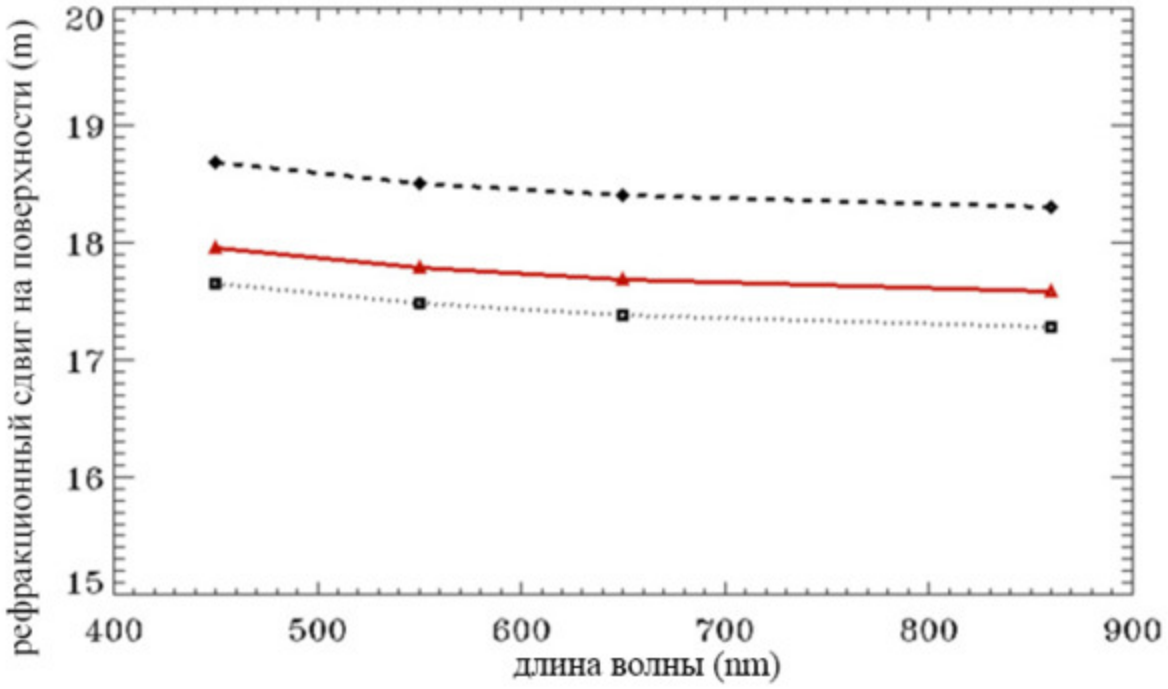


Рисунок 5.

Сверху вниз кривые — смещения пикселей преломляющей поверхности в зависимости от длины волны для субарктической зимы, стандартной атмосферы США 1976 года и тропической модельной атмосферы соответственно. Расчеты выполнены для высоты спутника 500 км и зенитного угла обзора спутника вниз 60 градусов.

3.5. Зависимость рефракционных сдвигов от высот поверхности

Как показано в уравнении (2), показатель преломления воздуха является функцией атмосферного давления. В общем случае поверхностное давление уменьшается с увеличением высоты

поверхности. Например, над городом Денвер в штате Колорадо высотой в милю поверхностное давление составляет всего около 85% от давления на уровне моря. На рис. 6 показана зависимость сдвигов пикселей преломляющей поверхности от высоты поверхности. Четыре кривые сверху вниз на рис. 6 представляют собой отношения сдвигов пикселей для высот поверхности 1, 2, 3 и 4 км по сравнению с 0 км. Все кривые рассчитаны для 550 нм зеленого света, высоты спутника 500 км, атмосферы модели США 1976 года и зенитных углов обзора спутника вниз от 5 до 60 градусов. Из этих кривых видно, что сдвиги пикселей преломляющей поверхности для высот поверхности 1, 2, 3 и 4 км уменьшаются примерно на 1, 3, 5,7 и 9% соответственно. Это уменьшение почти не зависит от зенитных углов спутникового обзора.

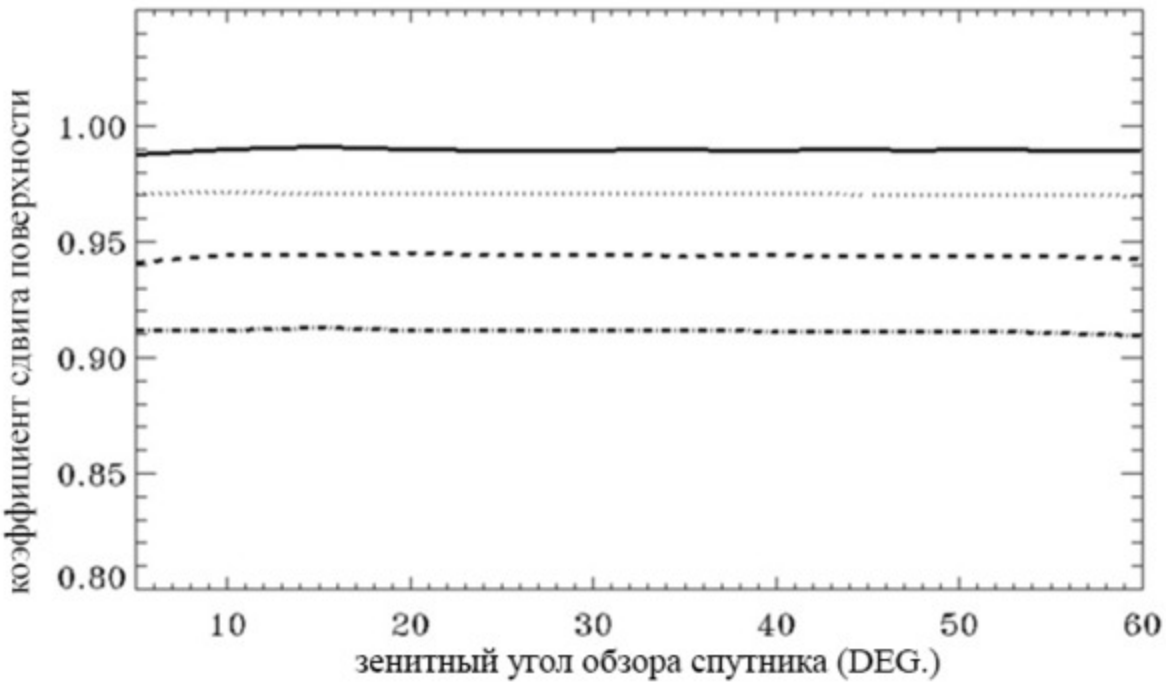


Рисунок 6.

Иллюстрации зависимости рефракционных сдвигов пикселей от высот поверхности. Сверху вниз кривые представляют собой отношения сдвигов преломляющих пикселей для высот поверхности 1, 2, 3 и 4 км по сравнению с 0 км соответственно.

4. ОБСУЖДЕНИЕ

Встроенная геометрия обзора LOWTRAN7 позволяет непосредственно моделировать эффекты атмосферного изгиба для траектории луча спутника на поверхность. Однако алгоритмы, разработанные астрономическим сообществом [4], как правило, не имеют высоты спутника в качестве явной переменной. В результате использование таких алгоритмов для изучения чувствительности сдвигов пикселей поверхности на высотах спутников не является простым (см. рис. 3), и необходимы дополнительные повороты координат.

5. РЕЗЮМЕ

Благодаря моему исследованию компьютерного кода LOWTRAN7, разработанного в конце 1980-х годов сообществом атмосферных наук, главным образом для моделирования атмосферных газообразных пропусканий и излучений, я обнаружил, что модели трассировки лучей, реализованные внутри LOWTRAN7 с незначительными модификациями, могут быть использованы для моделирования смещений пикселей поверхности в результате атмосферной рефракции для наблюдательной геометрии нисходящего спутника на поверхность земли. Я провел обширные расчеты смещений пикселей преломляющей поверхности с использованием модифицированного кода LOWTRAN7 для синего (450 нм), зеленого (550 нм), красного (650 нм) и ближнего ИК — (NIR) (860 нм) каналов с узкой шириной 10 нм; высоты спутников 300, 400, 500, 600, 700, и 800 км; зенитные углы обзора со спутника вниз от 5 до 80 градусов; три модельные атмосферы (стандартные, тропические и субарктические зимние модели 1976 года); и пять высот поверхности на 0, 1, 2, 3 и 4 км. Представлены зависимости смещений пикселей преломляющей поверхности от высот спутников, зенитных углов обзора спутника вниз, атмосферных моделей, длин волн и высот поверхности. Эти результаты могут иметь опорные значения для исследователей, чтобы оценить вызванные рефракцией смещения пикселей на их спутниковых снимках с высоким пространственным разрешением. Полученные результаты могут также потенциально помочь в разработке алгоритмов космических аппаратов для точного наведения приборов и задания задач полета для автоматического захвата кратковременных маломасштабных научных событий.

Рекомендации

1. Salamonson V.V., Barnes W.L., Maymon P.W., Montgomery H.E., Ostrow H. MODIS, Advanced facility instrument for studies of the Earth as a system. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 1989;**27**:145–153. doi: 10.1109/36.20292. [CrossRef] [Google Scholar]

2. King M.D., Menzel W.P., Kaufman Y.J., Tanré D., Gao B.C., Platnick S., Ackerman S.A., Remer L.A., Pincus R., Hubanks P.A. Cloud and aerosol properties, precipitable water, and profiles of temperature and humidity from MODIS. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 2003;**41**:442–458. doi: 10.1109/TGRS.2002.808226. [CrossRef] [Google Scholar]

3. Xiong X., Butler J., Chiang K., Efremova B., Fulbright J., Lei N., McIntire J., Oudrari H., Sun J., Wang Z., et al. VIIRS on-orbit calibration methodology and performance. *J. Geophys. Res. Atmos.* 2014;**119**:5065–5078. doi: 10.1002/2013JD020423. [CrossRef] [Google Scholar]

4. Noerdlinger P. Atmospheric refraction effects in Earth remote sensing. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 1999;**54**:360–373. doi: 10.1016/S0924—2716 (99) 00030—1. [CrossRef] [Google Scholar]

5. Mangum J.G., Wallace P. Atmospheric refractive electromagnetic wave bending and propagation delay. *Publ. Astron. Soc. Pac.* 2015;**127**:74–91. doi: 10.1086/679582. [CrossRef] [Google Scholar]

6. Yan M., Wang C., Ma J., Wang Z., Yu B. Correction of atmospheric refraction geolocation error for high resolution optical satellite pushbroom images. *Photogramm. Eng. Remote Sens.* 2016;**82**:427–435. doi: 10.14358/PERS.82.6.427. [CrossRef] [Google Scholar]

7. Selby J.E.A., Shettle E.P., McClachey R.A. Atmospheric Transmittance from 0.25 to 28.5 μm: Supplement LOWTRAN 3B (1976), AFGL-TR-76-0258. [(accessed on 30 November 2020)]; Available online: https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a040701.pdf.

8. Snider D.E. Refractive effects in remote sensing of the atmosphere with infrared transmission spectroscopy. *J. Atmos. Sci.* 1975;**32**:2178–2184. doi: 10.1175/1520-0469(1975)032<2178:REIRSO>2.0.CO;2. [CrossRef] [Google Scholar]

9. Gallery W.O., Kneizys F.X., Clough S.A. Air Mass Computer Program for Atmospheric Transmittance Radiance/Calculations: FSCATM, AFGL-TR-83-0065. [(accessed on 28 November 2020)];1983 Available online: https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/ADA132108.pdf.

10. Farmer C.B. Infrared measurements of stratospheric composition. *Can. J. Chem.* 1974;**52**:1544–1559. doi: 10.1139/v74—227. [CrossRef] [Google Scholar]

11. Murcray F.J., Goldman A., Murcray D.G., Cook G.R., van Allen J.W., Blatherwick R.D. Identification of isolated NO lines in balloon-borne infrared solar spectra. *Geophys. Res. Lett.* 1980;**7**:673–676. doi: 10.1029/GL007i009p00673. [CrossRef] [Google Scholar]

12. Farmer C.B., Norton R.H. *A High-Resolution Atlas of the Infrared Spectrum of the Sun and the Earth Atmosphere from Space*. Volume 1 NASA; Washington, DC, USA: 1989. NASA Reference Publication 1224. [Google Scholar]

13. Kneizys F.X., Shettle E.P., Gallery W.O., Chetwynd J.H., Abreu L.W., Selby J.E.A., Clough S.A., Fenn R.W. Atmospheric Transmittance/Radiance: Computer Code LOWTRAN 6, AFGL-TR-83-0187. [(accessed on 28 November 2020)];1983 Available online: https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/ADA137786.pdf.

14. Kneizys F.X., Shettle E.P., Abreu L.W., Chetwynd J.H., Anderson G.P., Gallery W.O., Selby J.E.A., Clough S.A. Users Guide to LOWTRAN 7, AFGL-TR-88-0177. [(accessed on 28 November 2020)];1988 Available online: https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a206773.pdf.

15. Berk A., Bernstein L.S., Anderson G.P., Acharya P.K., Robertson D.C., Chetwynd J.H., Adler-Golden S.M. MODTRAN cloud and multiple scattering upgrades with application to AVIRIS. *Remote Sens. Environ.* 1998;**65**:367–375. doi: 10.1016/S0034—4257 (98) 00045—5. [CrossRef] [Google Scholar]

16. Born M., Wolf E. *Principles of Optics*. Pergamon Press, Inc.; Elmsford, NY, USA: 1964. pp. 121–123. [Google Scholar]

17. Edlen B. The refractive index of air. *Metrologia*. 1966;**2**:71–80. doi: 10.1088/0026—1394/2/2/002. [CrossRef] [Google Scholar]