

# Моделирование отражённого солнечного излучения для оценки газового состава атмосферы при оптическом дистанционном зондировании из космоса

М.Ю. КАТАЕВ<sup>1</sup>, А.К. ЛУКЬЯНОВ<sup>2</sup>

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, г. Томск

<sup>1</sup> E-mail: kataev.m@sibmail.com

<sup>2</sup> E-mail: hyena116@mail.ru

## Аннотация

В настоящее время в оптическом дистанционном зондировании атмосферы из космоса появился новый класс задач по определению малых газовых компонентов (углекислый газ, метан и др.), которые обуславливают парниковый эффект. Содержание этих газов в атмосфере составляет доли процента, что накладывает жёсткие ограничения на точность спутниковых измерений и моделирование пространственной плотности потока отражённого Землёй излучения (сигнала). В статье приводится описание модели и результатов моделирования сигнала спутникового спектрометра для ближней ИК области спектра. Сигнал представляет собой прошедшее через слой атмосферы и отражённое от поверхности солнечное излучение, рассчитанное на основе параметрической модели рассеяния и поглощения излучения в атмосфере, в которой учтены как многомерная структура параметров атмосферы, так и рельеф поверхности Земли. Учёт подобной информации позволяет перейти от измерений пространственной плотности потока излучения в одной точке к расчётам содержания газа для произвольной географической точки земной поверхности и любого момента времени. В качестве примера представлены расчёты для Фурье-спектрометра для ближней ИК области спектра со средним спектральным разрешением, установленным на спутнике *GOSAT* космического агентства Японии. Сравнение рассчитанного и реально измеренного значения принимаемого спутником сигнала показывает, что отклонение для зенитного угла Солнца, равного 30°, не превышает 3 %.

**Ключевые слова:** атмосфера, поглощение, рассеяние, численная модель.

## 1. Введение

Спутниковый мониторинг окружающей среды представляет собой комплексную и регулярную систему мер наблюдения за состоянием окружающей среды (атмосферы и поверхности Земли). Обработка и анализ результатов измерений, сделанных в различные периоды времени, позволяют оценить тенденции изменения состояния параметров атмосферы или поверхности Земли под воздействием естественных и антропогенных факторов. Успех применения этих данных в различных областях науки и практики зависит от множества составляющих: математического моделирования приборной измерительной базы, прохождения излучения в атмосфере (учёт эффектов рассеяния и поглощения), отражения от поверхности Земли, методов решения обратной задачи и др.

Существуют различные способы классификации оптических методов контроля газового состава атмосферы из космоса. В зависимости от используемого источника излучения, оптические методы подразделяют на пассивные (внеатмосферные источники излучения, собственное и рассеянное излучение атмосферы) и активные (лазерные и тепловые источники). По физическим эффектам взаимодействия излучения со средой пассивные методы можно разделить на три группы: 1) трансмиссионные (метод прозрачности); 2) эмиссионные (метод собственного излучения); 3) метод рассеянного излучения. По геометрии проведения эксперимента выделяют надирные и лимбовые методы (см. рис. 1). Активные методы делят на локальные и дистанционные. Под локальными (*in situ*) измерениями подразумевают измерения концентрации того или иного газа в данной локальной точке применительно к полученным образцам воздуха.

Отметим, что трудности анализа газового состава оптическими методами связаны с тем, что: а) в атмосфере постоянно присутствуют два поглощающих компонента ( $H_2O$  и  $CO_2$ ), спектры поглощения которых перекрывают практически весь ИК диапазон, где находятся основные полосы поглощения других атмосферных газов, как основных, так и антропогенных; б) атмосфера неоднородна во времени и пространстве по температурному, газовому и аэрозольному составу; в) наряду с высотной структурой газового состава и температуры атмосферы, постоянно присутствуют турбулентные флуктуации среды; г) в атмосфере наличествует неустойчивая и сложная по составу смесь аэрозольных частиц, поглощающих и рассеивающих излучение; д) большинство атмосферных газов имеет весьма малые концентрации. Тем не менее, оптические методы нашли широкое применение в практике мониторинга газового состава атмосферы [1–5].

Среди всех выделенных методов, наиболее распространёнными являются пассивные методы измерения параметров атмосферы, имеющие целый ряд преимуществ: высокая чувствительность, высокое спектральное разрешение, точность измерений, отсутствие воздействия на исследуемый объект, высокий уровень развития приборной базы и др. Стоит отметить схему *B* (рис. 1), в которой детектор спутникового прибора «смотрит» сквозь атмосферу непосредственно на Солнце, в отличие от схемы *C* (рис. 1). Среди всех геометрий измерения, преимущество надирной схемы состоит в возможности получения непрерывных пространственных полей различных параметров атмосферы с хорошей периодичностью (от нескольких часов до нескольких дней).

Оптические измерительные устройства, расположенные на борту космических аппаратов, разделяют на мно-

гоканальные (от единиц до нескольких десятков каналов) и гиперспектральные приборы. К первому типу приборов относятся спектрометры, радиометры различного класса, а ко второй, чаще всего, Фурье-спектрометры. Именно Фурье-спектрометры позволяют с высокой точностью получать десятки тысяч точек в спектральных диапазонах от видимой до инфракрасной области спектра. Полученная информация несёт в себе все характерные особенности распространения излучения в атмосфере.

Разработка приборной базы и обработка результатов измерений связаны с применением моделей, включающих характеристики прибора, атмосферы и поверхности Земли. Модели, как правило, не в полной мере учитывают влияние различных факторов (зависимости от широты и долготы, времени измерений и др.) и физических процессов (шума прибора, флуктуаций атмосферы, высотной и пространственно-временной вариации значений параметров и др.). С другой стороны, учёт множества факторов весьма усложняет вычислительные модели и требует разработки специальных алгоритмов и привлечения соответствующих вычислительных средств. В связи с этим, возникает необходимость разработки моделей, которые с достаточной точностью позволяют имитировать сигналы, измеряемые спутниковыми оптическими приборами, а также использовать эту информацию для отработки методов решения обратных задач оптики атмосферы [6,7].

Возможности современных гиперспектральных спутниковых приборов позволяют уверенно решать фундаментальные задачи физики атмосферы, климата, экологии и др. В последние годы были запущены несколько приборов высокого разрешения: *IASI* (спутник *MetOp*, Европейский союз) [8], *SCIAMACHY* (спутник *ENVISAT*, Европейский союз) [9], *TANSO-FTS* (спутник *GOSAT*, Япония) [10], целью которых является получение информации о газовом и аэрозольном составе атмосферы.

Исследование климатообразующих параметров является классической научной задачей. Важную роль в формировании различных атмосферных процессов играют газовый состав и аэрозоль. Изучение в глобальном масштабе влияния аэрозоля на получение информации о газовом составе атмосферы имело сдерживающий фактор в виде отсутствия охватывающих большую территорию регулярных измерений.

Увеличение содержания ряда парниковых газов ( $CO_2$ ,  $H_2O$ ,  $CH_4$ ,  $N_2O$  и т.д.) приводит к изменениям излучательных свойств атмосферы и, как следствие, к изменениям климата Земли. Современные оценки вклада различных газов в процесс нагревания атмосферы показывают, что относительный вклад  $CO_2$ ,  $CH_4$ ,  $N_2O$  составляет 60, 20 и 6 % соответственно. Одним из признаков изменения климата является глобальное потепление, представляющее собой процесс постепенного увеличения среднегодовой температуры атмосферы Земли и Мирового океана. Позиция Межгосударственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК) ООН заключается в том, что со времени начала промышленной революции (вторая половина XVIII века) средняя по Земле температура поднялась на  $0,8^\circ C$  [11] и что большая доля потепления, наблюдавшегося в последние 50 лет, вызвана деятельностью человека [12, 13], в первую очередь, выбросом газов, вызывающих парниковый эффект: углекислого газа ( $CO_2$ ) и метана ( $CH_4$ ). В целом, причины изменений климата остаются

неизвестными и требуют исследования потоков излучения (восходящих и нисходящих), газового и аэрозольного состава атмосферы, для чего нужны регулярные и равномерно расположенные по поверхности Земли точки измерений. Провести такие измерения возможно лишь с помощью космических методов.

При этом прежние методы интерпретации спутниковой фотометрической информации, в той или иной степени основанные на методе подбора кривых, оказываются малоприменимыми, т.к. совпадения кривых в десятках тысяч точек добиться практически невозможно. С другой стороны, точность измерения в каждом канале, составляющая не менее чем 1 %, выдвигает новые жёсткие требования к модели переноса излучения в атмосфере – точность расчётов также должна быть не менее чем 1 %. Это приводит к тому, что хорошо разработанные методы решения задачи переноса излучения в плоском слое мутной среды становятся неприемлемыми. В таких условиях необходим строгий учёт особенностей рассеяния света в трёхмерной среде: вертикальной неоднородности атмосферы, разорванной облачности, профиля подстилающей поверхности.

Ранее нами предпринимались попытки решения задачи моделирования отражённого от поверхности солнечного излучения [14]. В предлагаемой вниманию статье рассматривается решение вопроса разработки программы, позволяющей для любого времени года и для любой точки земной поверхности рассчитывать отражённое солнечное излучение с учётом трёхмерной структуры атмосферы.

## 2. Постановка задачи

Излучение, попадающее на приёмник Фурье-спектрометра, смотрящего в нади́р (схема А, см. рис. 1) на поверхность Земли, состоит из двух потоков: солнечного излучения, отражённого поверхностью Земли, и солнечного излучения, рассеянного в толще атмосферы. Соотношение величин этих потоков зависит от угла склонения Солнца: чем больше склонение, тем больше вклад рассеянного в атмосфере потока. Пройдя путь в атмосфере дважды, принятый Фурье-спектрометром суммарный поток излучения содержит информацию о газовом составе и аэрозольном наполнении атмосферы. Целью настоящей работы является расчёт потоков солнечного излучения, принимаемого спутниковым Фурье-спектрометром в ближней ИК области спектра [15], и сравнение полученных значений с результатами измерений, проведённых на спутнике *GOSAT*<sup>1</sup>. При расчёте принимаемого спутником сигнала предполагается использование новых физических и математиче-

<sup>1</sup> *GOSAT (Ibuki)* – спутник дистанционного зондирования Земли, чьей задачей является мониторинг парниковых газов (*GOSAT* и *Ibuki* – это одно и то же, только первое название связано с английской фразой *Greenhouse gases Observing SATellite*, а *Ibuki* по японски – дыхание). *GOSAT* оборудован инфракрасными датчиками, на основе данных которых можно определить общее содержание углекислого газа и метана в атмосфере. Это датчик наблюдения парниковых газов (*TANSO-FTS*) и датчик облаков и аэрозолей (*TANSO-CAL*). В спектре, регистрируемом *TANSO-FTS*, полосы 1,6 мкм и 2,0 мкм в ближней ИК области спектра используются для наблюдения общего содержания  $CO_2$  и  $CH_4$ . Общее число спектральных каналов наблюдения достигает 18500.

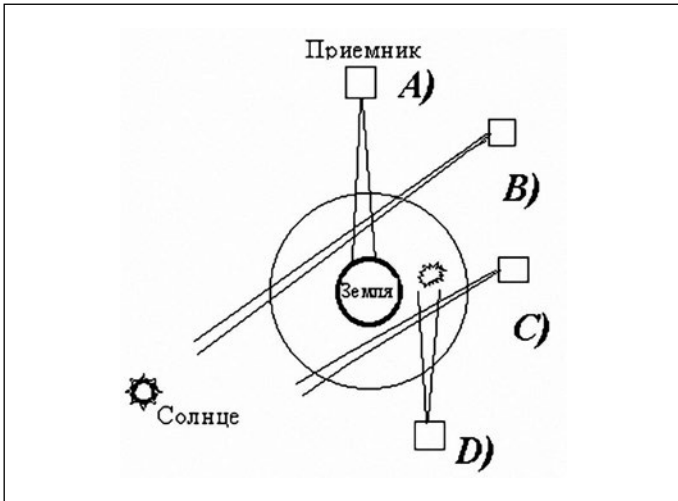


Рис. 1. Различные схемы зондирования атмосферы: А) надирная (метод теплового излучения – МТИ); В) касательная (метод прозрачности – МП); С) лимбовая (МТИ или метод обратного рассеяния – МОР) и D) эмиссионная

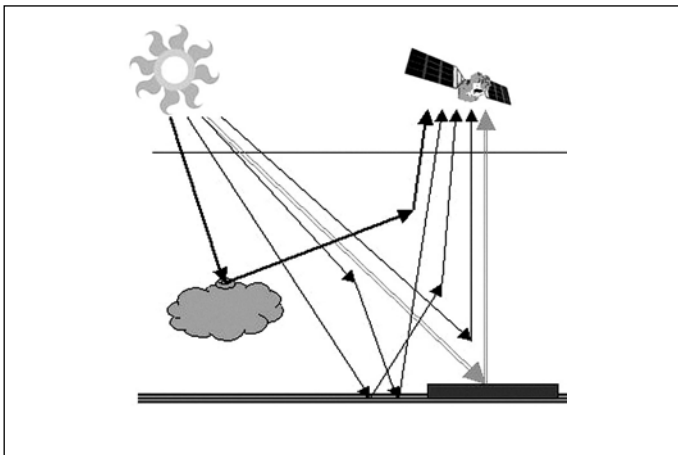


Рис. 2. Основные составляющие принимаемого спутником сигнала

ских моделей и методов, обеспечивающих не только повышение точности, но и значительное ускорение расчётов.

Взаимодействие солнечного излучения с атмосферой приводит к рассеянию и поглощению и количественно определяется свойствами газового состава атмосферы и типами аэрозоля. Излучение, которое было отражено от поверхности Земли или облаков, зависит от рельефа, отражающих свойств и температуры поверхности. Какая-то часть солнечного излучения, достигая спутникового прибора, зависит от поглощающих свойств атмосферы и, таким образом, может быть использована для определения газового состава атмосферы.

### 3. Описание модели

Солнечное излучение  $I_0(\lambda)$ , попадает в атмосферу Земли под разными углами в зависимости от времени дня и года, претерпевая поглощение газами и аэрозольными частицами атмосферы и рассеяние на них, а также отражение от облаков. Далее происходит отражение от поверхности Земли, которая характеризуется типами, каждому из которых соответствует своё спектральное распределение коэффициента отражения, и рельефом. Отражён-

ное излучение, прошедшее через атмосферу и попавшее на приёмное устройство спутникового прибора, состоит из множества составляющих (рис. 2). При этом рассеяние может быть однократным и многократным, а отражения могут происходить не только от наблюдаемой поверхности Земли, но и от облака, от поверхности вне поля зрения прибора и др. Каждая составляющая вносит разный вклад в принимаемый прибором сигнал [16].

В принимаемом установленном на *GOSAT* прибором (далее – прибор *GOSAT*) сигнале  $I(\lambda)$  можно выделить две основные составляющие: отражённый от поверхности поток солнечного излучения  $I_1(\lambda)$  и поток однократно рассеянного в атмосфере излучения  $I_2(\lambda)$ , тогда как другие составляющие вносят малый вклад (единицы процентов) в диапазоне изменения зенитного угла Солнца  $10^\circ < \theta_0 < 60^\circ$ .

С учётом геометрических факторов, типов поверхности и времени года, принимаемый спутником сигнал является многомерной функцией таких параметров, как пространственные координаты  $(x, y)$ , длина волны  $\lambda$ , зенитный угол Солнца  $\theta_0$ , время года  $t$  и высота над уровнем моря  $h$ . Учитывая многомерность формирования регистрируемого спутником сигнала, его можно представить в виде [17],

$$I(\lambda) = I_1(\lambda) + I_2(\lambda), \quad (1)$$

где:

$$I_1(\lambda) = I_0(\lambda) \cos(\theta_0(t)) r(\lambda, x, y) R_{surf}(x, y) T(\lambda, x, y, \theta_0, H, t), \quad (2)$$

$$I_2(\lambda) = \frac{I_0(\lambda)}{\mu_{sun}} \int_{H_0}^H \left( \alpha_{mol}(\lambda, x, y, h, t) + \alpha_{aer}(\lambda, x, y, h, t) \psi_{aer} F_{aer}(\gamma) \right) T(\lambda, x, y, \theta, h, t) dh, \quad (3)$$

$$\cos(\gamma) = -\mu_{sun} \mu_{sat} - \sqrt{(1 - \mu_{sun})(1 - \mu_{sat})} \cos(\theta_0), \quad (4)$$

$I_0(\lambda)$  – излучение Солнца вне атмосферы Земли;  $r(\lambda, x, y)$  – спектральный коэффициент отражения поверхности;  $R_{surf}(x, y)$  – параметр, отвечающий за рельеф;  $T(\lambda, x, y, \theta_0, H, t)$  и  $T(\lambda, x, y, \theta_0, h, t)$  – пропускание атмосферы на всей оптической трассе в атмосфере и на данной высоте  $h$ ;  $\theta_0$  – зенитный угол склонения Солнца (в данной работе азимутальный угол не учитывается);  $t$  – время,  $\lambda$  – длина волны;  $x, y$  – координаты точки,  $\alpha_{aer}$  и  $\alpha_{mol}$  – показатель ослабления за счёт рассеяния на аэрозолях и молекулах соответственно;  $\psi_{aer}$  и  $F_{aer}$  – характеристики рассеивания излучения аэрозолем (однократное альbedo и функция рассеяния соответственно);  $\mu_{sun}$  и  $\mu_{sat}$  – направления на Солнце и спутник для точки наблюдения соответственно ( $\mu = 1/\cos(\theta)$ ),  $H$  и  $H_0$  – толщина атмосферы (100 км) и высота местности над уровнем моря соответственно.

Пропускание атмосферы находится по выражению:

$$T(\lambda, x, y, \theta_0, h, t) = \exp(-m(\theta_0) \cdot \tau(\lambda, x, y, h, t)), \quad (5)$$

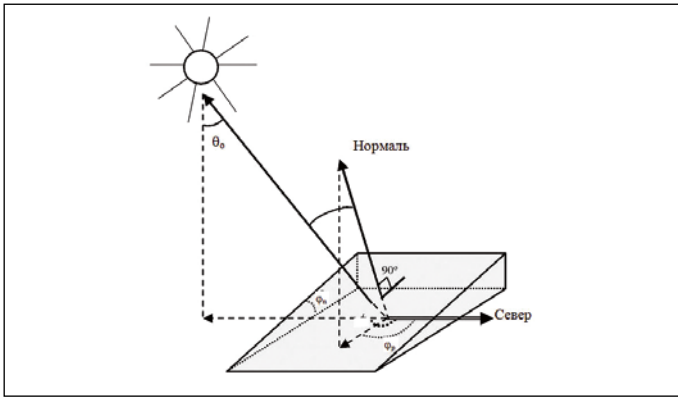


Рис. 3. Схема ориентации участка поверхности Земли относительно поля зрения спутникового прибора

$$\tau(\lambda, x, y, h, t) = \int_{H_0}^h (\alpha_{gas}(\lambda, x, y, h', t) + \alpha_{aer}(\lambda, x, y, h', t) + \alpha_{mol}(\lambda, x, y, h', t)) dh', \quad (6)$$

где  $m(\theta_0) = 1 / \cos(\theta_{sun}) + 1 / \cos(\theta_{sat})$ ;  $\tau(\lambda, x, y, h, t)$  – оптическая толщина атмосферы;  $\alpha_{gas}(\lambda, x, y, h, t)$  – показатель ослабления газами.

Ослабление излучения газами находится по выражению:

$$\alpha_{gas}(\lambda, x, y, h, t) = \sum_{j=1}^N K_j(\lambda, h) \rho_j(x, y, h, t), \quad (7)$$

где  $K_j(\lambda, h)$  – коэффициент поглощения газом  $j$ ,  $j = 1, \dots, N$ ;  $\rho_j(x, y, h, t)$  – профиль концентрации  $j$ -го газа на заданной высоте  $h$  и в заданный момент времени  $t$ .

Отражённое в направлении спутникового прибора излучение существенно зависит как от типа поверхности (за счёт его спектрального коэффициента отражения), так и от рельефа (рис. 3). Форм-фактор, учитывающий параметры рельефа, определяется выражением [18]:

$$R_{surf}(x, y) = \cos(\varphi_p(x, y)) / [\cos(\varphi_n(x, y)) \cos(\theta_0)], \quad (8)$$

где  $\theta_0$  – зенитный угол склонения солнца;  $\varphi_n$  – угол наклона выбранного участка поверхности;  $\varphi_p$  – угол поворота выбранного участка поверхности.

#### 4. Описание структуры программного обеспечения

Задача моделирования излучения, принимаемого спутниковым прибором, связана с расчётом прямого и однократно рассеянного солнечного излучения и отражения излучения от поверхности Земли в спектральной области 1,5–2,0 мкм. Для каждой части расчёта необходима своя априорная информация, на основе которой проводится расчёт, причём эта информация должна быть глобальной по пространству и охватывать время, включающее в себя, как минимум, один год. Отметим, что часть информации является одномерной, например, спектры отражения поверхностей разных типов, внеатмосферный солнечный спектр и др., другая часть – двумерной (рельеф земной поверхности, типы земной поверхности (например, вода, лес, поле и др.) и т.д.), а метеорологическая информация

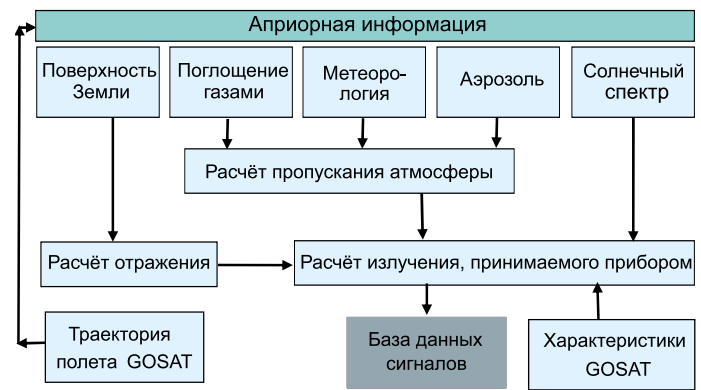


Рис. 4. Блок-схема программы расчёта принимаемого спутником сигнала

является четырёхмерной. Вследствие этого, перед началом расчётов проводится операция приведения всех массивов априорной информации к одной сетке, взаимосвязанной по пространству  $(x, y, h)$ , длине волны  $\lambda$  и времени  $t$ . После этого производится расчёт излучения, принимаемого спутниковым Фурье-спектрометром. Блок-схема программы расчёта принимаемого спутником сигнала приведена на рис. 4.

За три дня полёта (по заданной траектории) прибор *GOSAT* получает информацию в 12600 географических точках (диаметр пятна обзора составляет 10 км). При учёте только точек, расположенных над сушей (около 4000 точек), за год необходимо рассчитать почти полмиллиона точек. Для каждой географической точки имеется 18500 спектральных линий для трёх каналов Фурье-спектрометра. В итоге, необходимо рассчитать порядка  $10^{10}$  спектральных точек в приемлемый срок, удобный для работы, который, по нашему мнению, составляет не более нескольких часов. Последнее условие накладывает жёсткие ограничения на скорость расчётов с минимальным отклонением модели от реальных измеренных значений принимаемого спектрометром отражённого от поверхности солнечного излучения.

Наборы априорных данных формируются из известных источников научной информации – например, рельеф берётся из данных миссии *Shuttle radar topography mission* [19], поглощение газами рассчитывается на основе спектроскопической базы *HITRAN* [20], метеорологические параметры берутся из базы *NCEP* [21], показатель аэрозольного ослабления берётся из [22], а солнечный спектр – из [23].

Отметим, что известные программы расчёта принимаемых спутниками сигналов проводят вычисления только для одной пространственной точки. Предлагаемая нами программа позволяет проводить расчёты как для одной точки, так и по траектории полёта спутника. Для каждой точки формируется набор априорных данных (рис. 4). Затем для каждого набора программа выполняет расчёты принимаемых спутниками сигналов [24]. Если не применять методик ускорения считывания данных и расчётов, то время будет значительным, поэтому нами применялись технологии считывания *MMF (Memory-Mapped Files)* и элементы параллельных технологий. Технология *MMF* позволяет приложениям работать с файлами так же, как они работают с динамической памятью. Численный эксперимент, проведённый для поиска числа оптимальных по-



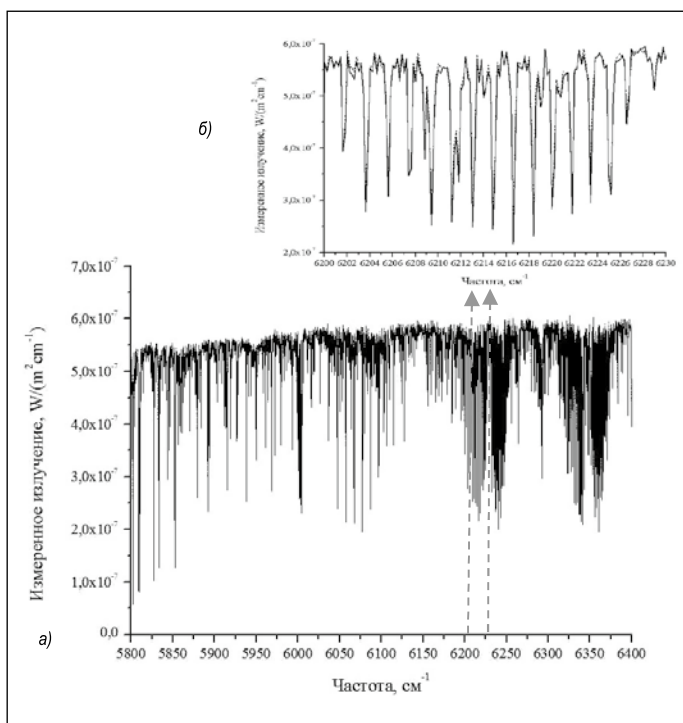


Рис. 5. Сравнение реального (сплошная линия) и рассчитанного (пунктирная линия) сигналов GOSAT (координаты точки 23,003° с.ш. и 14,869° в.д. – пустыня Сахара)

токов при изменении объёма данных в диапазоне от 64 кБ до 1 ГБ и использовании технологии *MMF*, показывает, что для чтения из файла наиболее эффективным количеством является 4–6 потоков. Распараллеливание заключалось в создании групп элементарных функций и наборов данных к ним, так чтобы все вычислительные узлы были загружены расчётами равномерно.

## 5. Описание полученных результатов

Из-за своей многогранности, рассматриваемая задача требует больших вычислительных затрат, что, в свою очередь, требует привлечения высокоскоростных вычислителей, программных технологий и алгоритмов. Представленная на рис. 4 блок-схема была положена в основу программы, работающей на вычислительном кластере, с переводом части алгоритмов в параллельный режим работы. Это позволило проводить массовые расчёты за относительно небольшое время, которое на настоящий момент составляет 12 ч. Сравнение результатов расчёта излучения, поступающего на прибор GOSAT, со значениями, реально измеренными для двух точек в условиях отсутствия облачности, проведено на рис. 5–7. На рис. 5, а и 6, а приведён спектральный ход излучения во втором канале спектрометра в районе 1,6 мкм, а на рис. 5, б и 6, б показана часть спектра в районе полосы поглощения углекислого газа, которая используется для решения обратной задачи – определения общего содержания  $CO_2$ .

Из рисунков видно, что отличие модельного (рассчитанного) и реального спектров присутствует, и основной причиной отклонений является неизвестное состояние атмосферы (метеорологические параметры, газовый состав и аэрозоль), а также изменение отражательной способности поверхности в точке измерения при данном состоянии

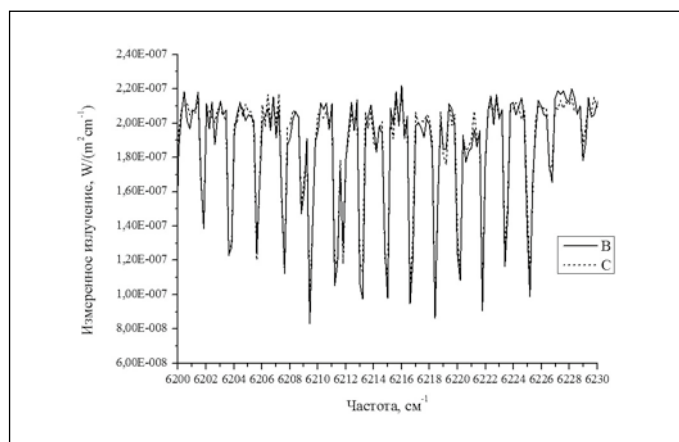


Рис. 6. Сравнение реального (сплошная линия) и рассчитанного (пунктирная линия) сигналов GOSAT (координаты точки 64,054° с.ш. и 69,141° в.д. – район северной тундры)

атмосферы. Отметим, что для однородных поверхностей, таких как песок, отклонение меньше, а для неоднородных, когда в поле зрения прибора попадают поверхности нескольких типов, эта погрешность немного больше. В целом, учитывая ещё и углы освещения поверхности Солнцем, основные величины отклонений лежат в диапазоне от 4–5 до 10–15 % (рис. 7).

Приведённые на рис. 7 результаты показывают, что при больших углах склонения Солнца модель расчёта принятого спутниковым спектрометром излучения даёт относительно большую погрешность при сравнении с реальными сигналами, что является следствием простой модели рассеяния. Однако если учесть, что предлагаемый вниманию комплекс программ позволяет рассчитывать за один проход множество данных по поверхности Земли с отклонением от реальности не хуже, чем 5–10 %, то этого достаточно для проведения численных экспериментов по отработке методик решения обратной задачи, разработки приборов и др. приложений.

## 6. Заключение

Использование космической измерительной техники при решении практических задач предъявляет новые требования к моделям трансформации солнечного излучения в системе «земная поверхность – атмосфера» с учётом специфики приборной базы измерений. Точность определения оптических характеристик атмосферы зависит от математической модели переноса излучения и соответствующей априорной информации. Для учёта факторов, влияющих на формирование измеряемого излучения,

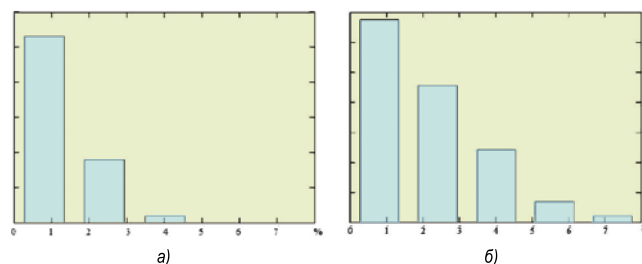


Рис. 7. Гистограмма отклонений сигнала, рассчитанного по модели, от реального при углах склонения Солнца 10° (а) и 60° (б)

необходимо при решении уравнения переноса излучения в трёхмерном представлении максимально полно учитывать как пространственно-временные флуктуации среды, так и особенности отражающей поверхности. Результаты представленной работы позволяют расширить возможности программ моделирования прохождения и трансформации излучения в атмосфере для более точного решения задач оптического дистанционного зондирования. Учёт многомерной структуры изменения атмосферных параметров в пространстве и времени является новым элементом в расчётах принимаемых спутниками сигналов. Использование модельного представления атмосферных параметров ограничивает точность рассчитываемых сигналов из-за значительного усреднения по времени и пространству, что не позволяет получить детальную информацию о вариации сигналов. Предлагаемая вниманию программа позволяет рассчитать принимаемые спутниками сигналы для любой точки земного шара и любого времени года. Полученные результаты говорят о приемлемости качества расчёта принимаемого *GOSAT* сигнала (5–10 %, при сравнении с реальными результатами измерений). Можно отметить, что получение более точных результатов требует построения новой модели аэрозольного рассеяния и отражения от поверхности.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Гуцин Г.П. Исследования атмосферного озона. – Л.: Гидрометеоздат, 1963. 289 с.
2. Хргиан А.Х. Физика атмосферного озона. – Л.: Гидрометеоздат, 1973. 285 с.
3. Малкевич М.С. Оптические исследования атмосферы со спутников. – М.: Наука, 1973. 303 с.
4. Кондратьев К.Я., Тимофеев Ю.М. Метеорологическое зондирование атмосферы из космоса. – Л.: Гидрометеоздат, 1978. 280 с.
5. Тимофеев Ю.М., Васильев А.В. Основы теоретической атмосферной оптики. – СПб., 2007. 152 с.
6. Hoffman N., Preetham A.J. Real-time light-atmosphere interactions for outdoor scenes. // Graphics programming methods. – 2003. – P. 337–352.
7. Otterman, J. Single-scattering solution for radiative transfer through a turbid atmosphere. // Appl. Opt. – 1978. – Vol.1, No.17(21). – P. 3431–3438.
8. <http://smsc.cnes.fr/IASI>
9. <http://www.sciamachy.org>
10. <http://www.gosat.nies.go.jp>
11. IPCC, Synthesis Report, Section 2.4: Attribution of climate change, in IPCC AR4 SYR2007
12. Solomon S., Qin D., Manning M., Chen Z., Marquis M., Averyt K.B., Tignor M., Miller H.L. (eds). IPCC-2007: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. // Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. – 996 pp.
13. Pachauri R.K., Meyer L.A. (eds.) IPCC-2014: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC, Geneva, Switzerland. – 151 pp.
14. Катаев М.Ю. Программная система моделирования отражённого от поверхности Земли солнечного излучения / М.Ю. Катаев, И.В. Бойченко // Доклады ТУСУР. – 2009. – № 1(19). – Ч. 1. – С. 88–95.

15. Крылов А.С., Втюрин А.Н., Герасимова Ю.В. Обработка данных инфракрасной Фурье спектроскопии. Методическое пособие. Препринт № 832Ф. Красноярск: Институт физики СО РАН, 2005. 48 с.

16. Hopfner M., Emde C. Comparison of single and multiple scattering approaches for the simulation of limb-emission observations in the mid-IR // Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer. – 2005. – Vol. 91, No. 3. – p.275–285

17. Breon F., Frouin R., Gautier C. Downwelling longwave irradiance at the ocean surface: An assessment of in situ measurements and parameterizations // J. Appl. Meteorol. – 1991. – Vol. 30. No.1. – p.17–31

18. Kane Van, R., Gillespie, A.R. Interpretation and topographic compensation of conifer canopy self-shadowing // Remote Sensing of Environment. – 2008. – Vol. 112. No. 10. – P. 3820–3822

19. Farr, T.G., Hensley, S., Rodriguez, E., Martin, J., Kobrick, M. The shuttle radar topography mission // CEOS SAR Workshop. Toulouse 26–29 Oct. 1999. Noordwijk. 2000. – P. 361–363

20. Rothman, L.S., Gordon, I.E., Babikov, Y. et al. The HITRAN2012 Molecular Spectroscopic Database // Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer. – 2013. – Vol.130, No. 11. – P. 4–50.

21. <http://www.ncep.noaa.gov/>.

22. Hess, M., Koepke, P., Schult, I. Optical Properties of Aerosols and clouds: The software package OPAC // Bull. Am. Met. Soc. – 1998. – Vol. 79, No. 5. – P. 831–844.

23. Thuillier, G., Herse, M., Simon, P.C., Labs, D., Mandel, H., Gillotay, D., Foujols, T. The solar spectral irradiance from 200 to 2400 nm as measured by the SOLSPEC spectrometer from the ATLAS1–2–3 and EURECA missions // Sol. Phys. – 2003. – Vol. 214, No. 1. – P. 1–22.

24. Катаев М.Ю., Лукьянов А.К. Параллельные технологии в задаче моделирования сигнала спутникового Фурье-спектрометра // Седьмая Сибирская конференция по параллельным и высокопроизводительным вычислениям. Программа и тезисы докладов (12–14 ноября 2013 г). Томск: Изд-во Том. ун-та, 2013. – С. 23–24.



**Катаев Михаил Юрьевич**, доктор техн. наук. Закончил Томский государственный университет по специальности «Инженер оптик-исследователь» (1984 г.). Профессор кафедры автоматизированных систем управления (АСУ) Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР), профессор Юргинского технологического института (филиала) Национального исследовательского Томского политехнического университета. Научный руководитель Центра космического мониторинга Земли ТУСУР



**Лукьянов Андрей Кириллович**, кандидат техн. наук. Закончил ТУСУР по специальности «Информатика и вычислительная техника (программное обеспечение)» (2010 г.). Доцент кафедры автоматизированных систем управления ТУСУР