

Якунин Максим Алексеевич

**КОНТРОЛЬ ПОГЛОЩЁННОЙ ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ
СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВОГО МОНИТОРИНГА НА
ОСНОВЕ СПЕКТРАЛЬНОГО ПОДХОДА**

Специальность:

05.11.13 — Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий

Автореферат

диссертации на соискании учёной степени

кандидата технических наук

Работа выполнена на кафедре радиофизики и теоретической физики федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Алтайский государственный университет».

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
профессор **Лагутин Анатолий Алексеевич**

Официальные оппоненты: **Гужов Владимир Иванович**, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Новосибирский государственный технический университет», профессор кафедры систем сбора и обработки данных.

Тихомиров Александр Алексеевич, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт мониторинга климатических и экологических систем Сибирского отделения Российской академии наук (ИМКЭС СО РАН), заведующий лабораторией экологического приборостроения.

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва»

Защита состоится 27 сентября 2016 г. в 15:00 на заседании диссертационного совета Д 212.269.09 в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: г. Томск, проспект Ленина, 30.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» и на сайте:

<http://portal.tpu.ru/council/916/worklist>

Автореферат разослан

Учёный секретарь
диссертационного совета

к.т.н.



Васендина Елена Александровна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Поглощённая подстилающей поверхностью солнечная энергия оказывает ключевое влияние на процессы испарения, прогрев воздуха и почвы, формирование облаков, циркуляцию атмосферы и климат на региональном и глобальном уровне.

Существует два принципиально разных подхода к решению задачи контроля поглощённой подстилающей поверхностью (ПП) энергии: использование наземных станций, определяющих количество падающей и отражённой энергии, и данных спутниковых приборов, измеряющих уходящее излучение. Первый подход отличается простотой реализации, имеет ряд преимуществ и недостатков. Преимуществами являются возможность проведения круглосуточного мониторинга и отслеживания динамики изменения количества поглощённой энергии, а также высокая точность полученных данных. Основным недостатком станций наземного наблюдения заключается в локальном измерении поглощённой энергии, что делает невозможным мониторинг обширных и неоднородных по свойствам ПП территорий.

Приборы, вынесенные на спутниковые платформы, позволяют проводить мониторинг больших территорий. Исследования последних десятилетий были основаны на обработке спутниковых данных низкого пространственного разрешения, полученных в результате глобальных экспериментов 80-90-х годов, таких как ERBE (2.5°) и ISCCP (280 км). В настоящее время в основном используются спутниковые данные высокого пространственного разрешения приборов платформ Terra, Aqua, Suomi NPP и регрессионные методы, позволяющие восстанавливать поглощённую энергию по интенсивности излучения на верхней границе атмосферы (ВГА). Однако, эти методы связаны с конкретными спутниками и каналами спектрорадиометра, что ограничивает их временное разрешение и точность. Работы, реализующие эти методы, демонстрируют значительный разброс в полученной ими погрешности восстановления поглощённой энергии (50-120 Вт/м²). Попытки применить их на других территориях не подтверждают указанные в них погрешности. Эти результаты можно объяснить использованием стандартных наборов альbedo ПП и ограниченно-го числа спектральных каналов, ошибками пространственной и временной синхронизации данных в методиках верификации. На данный момент не существует методов, обеспечивающих высокую точность контроля поглощённой ПП энергии на обширных территориях и не связанных с данными конкретных спутниковых платформ и каналов спектрорадиометра, поэтому разработка такого метода является актуальной научной задачей. В качестве перспективного варианта решения этой задачи предлагается гибридный метод на основе спутниковых данных высокого пространственного разрешения (до 10×10 км²), в котором контроль поглощённой ПП энергии осуществляется через восстановление спектров потока падающего излучения и альbedo ПП с использованием программного комплекса MOD-TRAN5.2.1 или опорных спектров. Такой метод не связан с конкретными спутниковыми

платформами, каналами спектрорадиометра и территориями.

Целью исследования является разработка нового гибридного метода контроля поглощённой ПП энергии по данным спутникового мониторинга на основе спектрального подхода и восстановления спектрального альбедо.

Для достижения поставленной цели решаются следующие **задачи**, в рамках которых разрабатываются:

1. Итерационная методика восстановления спектрального альбедо по откликам в каналах спектрорадиометра в оптическом и ближнем инфракрасном диапазонах.
2. Метод контроля поглощённой ПП энергии на основе спектрального подхода и восстановления спектрального альбедо, реализованный с использованием MODTRAN5.2.1.
3. Метод опорных спектров и методика аппроксимации функций преобразования для восстановления спектров потоков и интенсивностей излучения на ПП и ВГА.
4. Программный комплекс для аппроксимации функций преобразования.
5. Метод оперативного контроля поглощённой ПП энергии на основе опорных спектров.
6. Программный модуль для оперативного контроля поглощённой ПП энергии.
7. Методики верификации полученных результатов по данным сети наземных станций SURFRAD.

Материалы и методы исследования. В работе использовались данные спектрорадиометра MODIS/Terra и данные сети станций наземного наблюдения радиационного баланса SURFRAD, программный комплекс MODTRAN5.2.1 для моделирования спектров распространяющегося в атмосфере излучения. Для обработки результатов моделирования использовались авторские программы, разработанные на языках FORTRAN и Bash. Аппроксимация функций преобразования проводилась с использованием разработанного программного комплекса на основе пакета прикладных математических программ Scilab.

Научная новизна исследования заключается в разработке гибридного метода контроля поглощённой подстилающей поверхностью энергии по спутниковым данным на основе спектрального подхода, новых методических и программных решений, реализованного с использованием программного комплекса MODTRAN или опорных спектров, и состоит в следующем:

1. Предложена методика восстановления спектрального альбедо подстилающей поверхности по откликам в каналах спектрорадиометра в оптическом и ближнем инфракрасном диапазонах.
2. Предложена методика восстановления спектров потоков и интенсивностей излучения на уровне подстилающей поверхности и верхней границы атмосферы на основе опорных спектров и соответствующих функций преобразования.
3. Предложена методика аппроксимации функций преобразования и её программная реализация с пошаговым контролем ошибок на всех этапах вычислений на основе многокритериального анализа.

На защиту выносятся:

1. Методика восстановления спектрального альbedo подстилающей поверхности по откликам в каналах спектрорадиометра в оптическом и ближнем инфракрасном диапазонах.

2. Метод контроля поглощённой подстилающей поверхностью энергии по данным спутникового мониторинга на основе спектрального подхода и восстановления спектрального альbedo, реализованный с использованием MODTRAN.

3. Метод опорных спектров и методика аппроксимации функций преобразования для восстановления спектров потоков и интенсивностей излучения на уровне подстилающей поверхности и верхней границе атмосферы и их программная реализация.

4. Метод оперативного контроля поглощённой подстилающей поверхностью энергии по спутниковым данным на основе опорных спектров и его программная реализация.

Практическая ценность работы. Разработанные методы позволяют:

1. Повысить точность контроля поглощённой ПП энергии на обширных и неоднородных территориях.

2. Использовать данные различных спутниковых платформ и каналов спектрорадиометра, что увеличивает временное разрешение контроля.

3. Проводить мониторинг поглощённой энергии на больших территориях независимо от их географического положения и особенностей атмосферы.

Программный модуль оперативного контроля поглощённой ПП энергии внедрён в отделе космического мониторинга и прогнозирования ЧС АлтГУ, а также в Институте водных и экологических проблем СО РАН для решения задач мониторинга окружающей среды.

Достоверность научных положений и выводов, содержащихся в диссертационной работе, обеспечивается за счёт использования валидированных данных спектрорадиометра MODIS, подтверждена результатами компьютерного моделирования и вычислительных экспериментов, проведённых при помощи программного комплекса MODTRAN, результатами верификации по данным сети наземных станций SURFRAD, программными модулями, разработанными в пакете прикладных математических программ Scilab.

Апробация работы. Результаты исследований апробированы на научно-технических и научно-практических конференциях различного уровня: II Международной конференции «Геоинформатика: технологии, научные проекты» (Барнаул, 2010), III НПК «Информатизационно-измерительная техника и технологии» (Томск, 2012), XIX, XX, XXI Рабочих группах «Аэрозоли Сибири» (Томск, 2012, 2013, 2014), Молодёжной школе-семинаре «Дистанционное зондирование Земли из космоса: алгоритмы, технологии, данные» (Барнаул, 2013), Двенадцатой Всероссийской открытой конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (Москва, 2014), 14 Международной конференции «Измерение, контроль, информатизация» (Барнаул, 2013), II Всероссийской с международным участием научно-практической конференции по инновациям в неразрушающем контроле SibTest (Томск, 2013). По результатам проведённых исследований получены дипломы II и III степени.

В 2012-2014 годах исследования автора поддерживались стипендией Губернатора Алтайского края имени лётчика-космонавта Г.С. Титова.

Публикации. Результаты диссертационного исследования представлены в 18 печатных работах, в том числе в 6 статьях в изданиях, рекомендованных ВАК для публикации результатов диссертационных работ. Получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ «Расчёт количества поглощённой солнечной энергии по данным MODIS».

Личный вклад автора. Настройка, сборка и установка моделирующего комплекса MODTRAN5.2.1, проведение вычислительных экспериментов по оценке влияния параметров атмосферы, ПП и условий наблюдения на исследуемые спектры и альbedo ПП на показания спутникового прибора, определение по результатам анализа данных MODIS диапазонов изменения параметров атмосферы, используемых для моделирования, разработка итерационной методики восстановления спектрального альbedo по откликам каналов спутникового прибора, метода контроля поглощённой ПП энергии с использованием MODTRAN и его верификация по данным наземных станций SURFRAD, метода опорных спектров с аппроксимацией функций преобразования для восстановления искомым спектров, метода оперативного контроля поглощённой ПП энергии на обширных территориях на основе опорных спектров, программного комплекса для расчёта коэффициентов аппроксимации функций преобразования, программного модуля оперативного контроля поглощённой ПП энергии на основе опорных спектров и его верификация, а также программного интерфейсного модуля для исследования спектральных зависимостей и выбора опорных спектров выполнены автором самостоятельно.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы и приложения. Всего в работе 122 страницы, 3 приложения, 44 рисунка и 20 таблиц. Список источников включает 119 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследования, научная новизна работы, её практическая ценность и апробация, положения, выносимые на защиту.

В первой главе описаны программно-техническое и методическое обеспечение контроля поглощённой ПП энергии на обширных территориях. Обоснована необходимость использования спутниковых данных высокого пространственного разрешения. Рассмотрены современные методы контроля поглощённой ПП энергии. Экспериментально установлена необходимость восстановления спектрального альbedo ПП. Аргументировано использование программного комплекса MODTRAN5.2.1 для расчёта исследуемых потоков излучения и контроля поглощённой ПП энергии. Предложен новый гибридный метод контроля поглощённой ПП энергии по спутниковым данным на основе спектрального подхода,

предполагающий реализацию с использованием MODTRAN или опорных спектров. Суть метода заключается в восстановлении поглощённой ПП энергии F_a через спектральные зависимости — поток падающего на поверхность излучения $F_s(\lambda)$ и альбедо ПП $a(\lambda)$:

$$F_a = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} F_s(\lambda)(1 - a(\lambda))d\lambda. \quad (1)$$

Высокая точность контроля поглощённой ПП энергии в предлагаемом методе обусловлена использованием данных валидированных источников и высокой точностью восстановления спектрального альбедо $a(\lambda)$ и потока падающего излучения $F_s(\lambda)$. Для восстановления спектрального альбедо была разработана итерационная методика определения актуальных значений альбедо ПП по откликам каналов спектрорадиометра. Погрешность восстановления $F_s(\lambda)$ с использованием MODTRAN не превышает 2%. Точность же восстановления $F_s(\lambda)$ с использованием опорных спектров корректируется пошаговым контролем ошибок на каждом этапе вычислений в соответствии с методикой аппроксимации функций преобразования, который выполняется с помощью специально разработанных программных модулей.

Во второй главе представлен метод контроля поглощённой ПП энергии по спутниковым данным на основе спектрального подхода и восстановления спектрального альбедо, реализованный с использованием MODTRAN. Программный комплекс MODTRAN позволяет по заданным параметрам атмосферы и условиям наблюдения (аэрозольная оптическая толщина (АОТ) τ , полное содержание водяного пара в столбе атмосферы w , солнечный зенитный угол (СЗУ) θ , зенитный угол наблюдения (ЗУН) β , относительный азимутальный угол (ОАУ) Солнца и спутникового прибора ϕ), полученным спектрорадиометром MODIS, рассчитывать спектр падающего излучения $F_s(\lambda)$. Спектральное альбедо ПП $a(\lambda)$ восстанавливается в соответствии с предложенной итерационной методикой. Для её реализации необходимы спутниковые данные о состоянии атмосферы, условиях наблюдения и интенсивности на ВГА, и возможность моделировать показания спутникового прибора по заданным параметрам.

Суть методики заключается в следующем. По начальному спектральному альбедо $a(\lambda)$, выбранному в соответствии с типом ПП рассматриваемого пикселя спутниковой сцены, восстанавливается спектр интенсивности излучения $L(\lambda)$ на ВГА с учётом его зависимости от альбедо поверхности при заданных параметрах атмосферы и условиях наблюдения. Рассчитываются интенсивности в каналах спектрорадиометра с учётом функций чувствительности прибора. Устанавливаются значения невязок между рассчитанными и измеренными интенсивностями в каналах, которые минимизируются коррекцией альбедо. Вследствие практически линейной зависимости интенсивности излучения на ВГА от альбедо ПП для корректировки значений альбедо используется метод секущих. На первой итерации в качестве второй точки выбирается значение альбедо $a_2 = a_1(1 + 1.5\eta)$, η — относительная невязка, a_1 — начальное значение альбедо в каналах. Если значение альбедо в канале после первой итерации выходит за диапазон возможных значений $[0, 1]$, то оно

выбирается равным соответствующей границе данного интервала. В рамках одной итерации корректируются значения альbedo для всех выбранных каналов спектро радиометра и затем интерполируются сплайном. Процедура повторяется до тех пор, пока величина невязок для всех выбранных каналов не будет меньше наперёд заданной погрешности. Значения альbedo в каналах (и соответствующее интерполированное спектральное альbedo), минимизирующие невязки до установленной погрешности, являются актуальными для рассматриваемой сцены.

Реализация этой методики с использованием MODTRAN основана на его возможности моделировать показания каналов спектро радиометра. На основании данных, полученных MODIS о состоянии атмосферы и условий наблюдения ($\tau, w, \theta, \beta, \phi, a(\lambda)$), а также функций чувствительности спектральных каналов, рассчитывались значения интенсивности излучения в каналах прибора. Варьируя значения спектрального альbedo ПП во входных данных MODTRAN, получали расчётные значения интенсивности в каналах спектро радиометра и сравнивали с измеренным спутниковым прибором значениями. За несколько итераций-запусков MODTRAN (обычно не больше 8) восстанавливался спектр альbedo, при котором расчётные значения интенсивности излучения на ВГА совпадали с реально измеренным в пределах заданной погрешности ($\leq 2\%$ от величины измеренной интенсивности). Использовались показания каналов 1-7 спектро радиометра MODIS/Terra, покрывающие диапазон длин волн 0.46–2.16 мкм. Обработка каждой точки спутниковой сцены занимала 6-9 минут при использовании персонального компьютера.

Алгоритм восстановления количества поглощённой ПП энергии с использованием MODTRAN представлен на рис. 1. В соответствии с ним был разработан программный

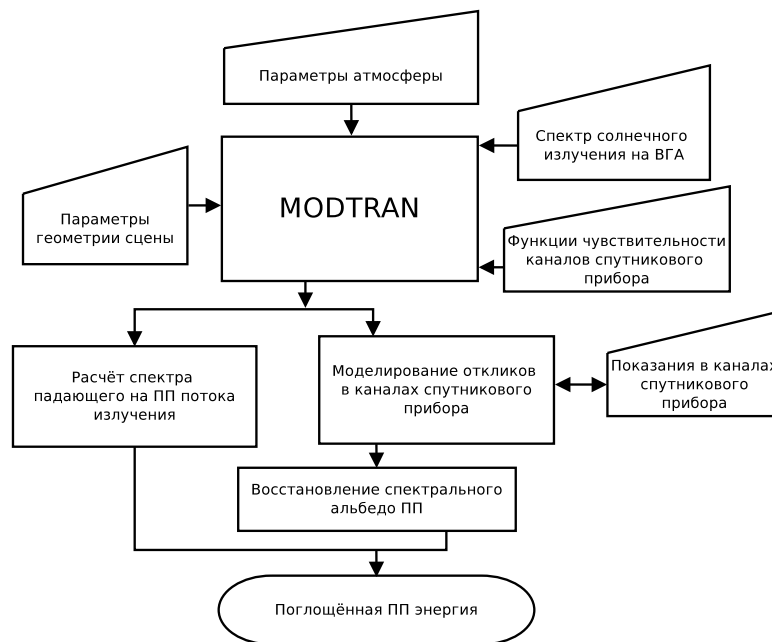


Рис. 1. Алгоритм восстановления поглощённой ПП энергии с использованием MODTRAN модуль, включающий в себя утилиту распаковки спутниковых данных формата .hdf и из-

влечению необходимых массивов данных с определённых территорий, а также интерфейс взаимодействия с программным комплексом MODTRAN для расчёта спектра падающего на ПП потока излучения, восстановления спектрального альбеда ПП и количества поглощённой энергии.

Для оценки точности предложенного метода была проведена верификация полученных результатов с использованием данных сети станций наземного наблюдения SURFRAD США, измеряющих потоки падающего и восходящего излучения. Для сравнения были выбраны три станции (Bondville, Boulder, Desert Rock) и соответствующие спутниковые сцены MODIS. Всего было отобрано 75 спутниковых сцен по 25 для каждой из станций. Для набора спутниковых данных для каждой сцены и данных станций SURFRAD проводились процедуры пространственной (по координатам наземной станции) и временной (по времени сканирования точки с заданными координатами) синхронизации. После этого для найденной точки вычислялось значение поглощённой ПП энергии по предложенной методике, которое затем сравнивалось с соответствующим значением, измеренным на станции. Результат верификации показал, что для безоблачных сцен величина среднеквадратичного отклонения поглощённой энергии составляет 36-44 Вт/м². Гибридный метод, реализованный с использованием MODTRAN, является достаточно точным для большинства современных приложений, но непригодным для оперативного контроля поглощённой энергии ввиду его низкого быстродействия.

Третья глава посвящена разработке метода оперативного контроля поглощённой ПП энергии. Для решения этой задачи необходимо восстанавливать спектры потоков падающего прямого и рассеянного излучения и интенсивностей на ВГА при нулевом и единичном альбеде (последние необходимы для восстановления спектрального альбеда поверхности). Их можно рассчитать с помощью MODTRAN для пространства параметров атмосферы и условий наблюдения с мелким шагом разбиения и использовать в качестве справочных таблиц (lookup tables). Однако, такой подход потребует хранения большого объёма данных (до сотни гигабайт). В качестве альтернативы для восстановления этих спектров предлагается метод опорных спектров. Опорным является спектр, воздействуя на который некоторой функцией преобразования, можно получить искомый спектр:

$$S(\lambda, p) = \hat{K} S_0(\lambda, p_0). \quad (2)$$

Здесь $S_0(\lambda, p_0)$ — опорный спектр, определённый для заданных параметров атмосферы, ПП и условий наблюдения p_0 , который может быть рассчитан с использованием MODTRAN или получен на предыдущем этапе вычислений, $S(\lambda, p)$ — искомый спектр для произвольных значений параметров p , \hat{K} — оператор или функция преобразования (ФП). Опорные спектры выбираются из семейства искомого спектров или являются иной спектральной зависимостью, связанной с искомым спектром. ФП является отношением этих спектров и должна представлять собой достаточно гладкую кривую: $f = f(\lambda, p)$, где $p \in P = \{\tau, w, \theta, \beta, \phi, a(\lambda)\}$ — точка в пространстве параметров сопровождения. В ряде случаев эта

функция допускает редукцию размерности входящих в неё параметров путём представления её в виде $f = \prod f_i$, где f_i зависит только от части параметров. Таким образом, задача аппроксимации состоит в нахождении коэффициентов ФП для произвольных значений p по набору коэффициентов ФП, вычисленных для заданных значений p_i . На первом этапе выполняется аппроксимация $f(\lambda, p)$ по λ для каждого заданного значения p_i :

$$f_i = f_i(\lambda, k_i), \quad (3)$$

где $k_i = k(p_i) = \{k^{(1)}(p_i), k^{(2)}(p_i), \dots, k^{(j)}(p_i) \dots k^{(n)}(p_i)\}$ — набор коэффициентов аппроксимирующей функции. Шаг разбиения сетки пространства параметров P и необходимость применения равномерной или неравномерной сетки зависит от характера зависимостей $k^{(j)}(p)$. На втором этапе находится зависимость $k(p)$ для произвольных значений параметров p . Этот этап может быть реализован посредством двух разных подходов. Первый основан на многомерной интерполяции, однако его применение может привести к аномально большим ошибкам вследствие появления на интерполирующих гиперповерхностях ложных выбросов, обусловленных видом интерполирующей функции. Такое явление может наблюдаться при редком шаге разбиения пространства P и наличия на интересующем участке резких изменений градиента функции $k(p)$. Второй подход предполагает по найденным на первом этапе значениям $k(p_i)$ построение отдельной аппроксимации для каждого коэффициента $k^{(j)}(p)$. При этом процесс построения такой аппроксимации расщепляется на два варианта реализации. В первом производится одновременная аппроксимация по всем компонентам параметра p , от которых зависят $k^{(p)}$. Во втором аппроксимация выполняется последовательно через плазовые поверхности. Для этого сначала ищется аппроксимация $k^{(j)}$ от одного из компонентов $p^{(a)}$ при фиксированных значениях других компонентов, и находятся коэффициенты A_{jq} , описывающие соответствующую функцию. Затем уже выполняется аппроксимация A_{jq} как функции от других компонентов p , находятся описывающие её коэффициенты B_{jqz} от z -го компонента p , и так до тех пор, пока не будут перебраны все параметры. Поскольку ФП в ряде случаев за счёт редукции размерности можно свести к двумерному виду, в ходе соответствующей этим случаям трёхъярусной аппроксимации получится матрица коэффициентов B_{jqz} , посредством которой для заданных значений p сначала находятся коэффициенты матрицы A_{jq} , через них — коэффициенты вектора $k(p)$, и уже через них вычисляется вид функции $f(\lambda, p)$.

Для оценки точности аппроксимации используются МНК, реализуемый в Scilab, и следующие критерии: относительная, приведённая ошибки аппроксимирующей функции и их максимальные значения, а также средние значения их модулей. Выбор конкретного критерия определяется практической потребностью и физическим смыслом аппроксимируемой зависимости. Аппроксимация ФП проводилась с помощью программных модулей, что позволило вести пошаговый контроль её точности по выбранным критериям.

Восстановление спектра падающего на ПП потока излучения делится на два этапа: восстановление спектра прямого падающего излучения и спектра рассеянного излучения.

Спектр прямого падающего на ПП излучения представляет собой долю излучения, которое не претерпело рассеяния. Процесс поглощения излучения в атмосфере в первом приближении может быть записан в соответствии с законом Бугера-Ламберта-Бера:

$$F(\lambda) = F_{sun}(\lambda)e^{-k(\lambda)l_0/\cos\theta}, \quad (4)$$

где $F_{sun}(\lambda)$ — солнечная постоянная, $F(\lambda)$ — поток излучения после прохождения в поглощающей среде расстояния $l_0/\cos\theta$, а $k(\lambda)$ — коэффициент поглощения, зависящий от природы и состава поглощающего компонента атмосферы и длины волны λ . Поглощение излучения можно описать, используя функцию пропускания атмосферы $T(\lambda)$:

$$F(\lambda) = F_{sun}(\lambda)T(\lambda). \quad (5)$$

Таким образом, функцию пропускания атмосферы можно представить в виде

$$T(\lambda) = \exp\left(-k(\lambda)\frac{l_0}{\cos\theta}\right). \quad (6)$$

Известно, что функция пропускания атмосферы T представляет собой произведение частных функций пропускания её компонентов T_i :

$$T = T_1 \cdot T_2 \dots T_n, \quad (7)$$

для каждого из которых справедливо соотношение (6), а $k_i(\lambda) = c_i \cdot s_i(\lambda)$, где c_i — коэффициент, количественно отражающий поглощающие свойства компонента атмосферы, например, для аэрозоля — АОТ, для водяного пара — полное его содержание в столбе атмосферы, $s_i(\lambda)$ — спектральная функция компонента атмосферы. Выражение (6) для опорного спектра T_{i0} при заданных значениях коэффициента c_{i0} и зенитного угла θ_{i0} будет иметь вид

$$T_{i0} = \exp\left(-\frac{c_{i0}l_0}{\cos\theta_{i0}}s_i(\lambda)\right). \quad (8)$$

Тогда функцию пропускания T_i для произвольных значений коэффициента c_i и солнечного зенитного угла θ_i можно вычислить через опорный спектр:

$$T_i = T_{i0}^{\frac{\cos\theta_{i0}}{c_{i0}} \cdot \frac{c_i}{\cos\theta_i}} \quad \text{или} \quad T_i = \widehat{C}T_{i0}. \quad (9)$$

Анализ зависимостей функций пропускания атмосферы от вариации её компонентов показал, что наиболее значимыми являются АОТ и полное содержание водяного пара. Исходя из этого можно рассчитать спектр потока прямого падающего излучения:

$$F_{dir} = F_{sun} \cdot \widehat{W}T_{water0} \cdot \widehat{A}T_{aer0} \cdot T_{atm0}|_{\theta} \cdot \cos\theta, \quad (10)$$

где \widehat{W} — оператор преобразования опорного спектра функции пропускания водяного пара T_{water0} , \widehat{A} — оператор преобразования опорного спектра функции пропускания аэрозоля T_{aer0} , $T_{atm0}|_{\theta}$ — спектр функции пропускания остальных составляющих атмосферы, приведённый к солнечному зенитному углу θ ($T_{atm0}|_{\theta} = T_{atm0} \cdot \exp(\cos\theta_0/\cos\theta)$). Опорные спектры T_{water0} , T_{aer0} , T_{atm0} рассчитываются с помощью MODTRAN.

Точность восстановления прямого падающего потока оценивалась путём его сравнения с соответствующей величиной, рассчитанной на MODTRAN. Результаты по выбранным

критериям составили: среднее значение относительной ошибки 2.8%, среднее значение приведённой ошибки 1.9%.

Для восстановления спектра падающего рассеянного излучения в качестве опорного был выбран восстановленный на предыдущем этапе спектр падающего прямого излучения, поскольку логарифм отношения этих спектров представляет собой довольно гладкую функцию (рис. 2). Задача восстановления спектра падающего рассеянного излучения сво-

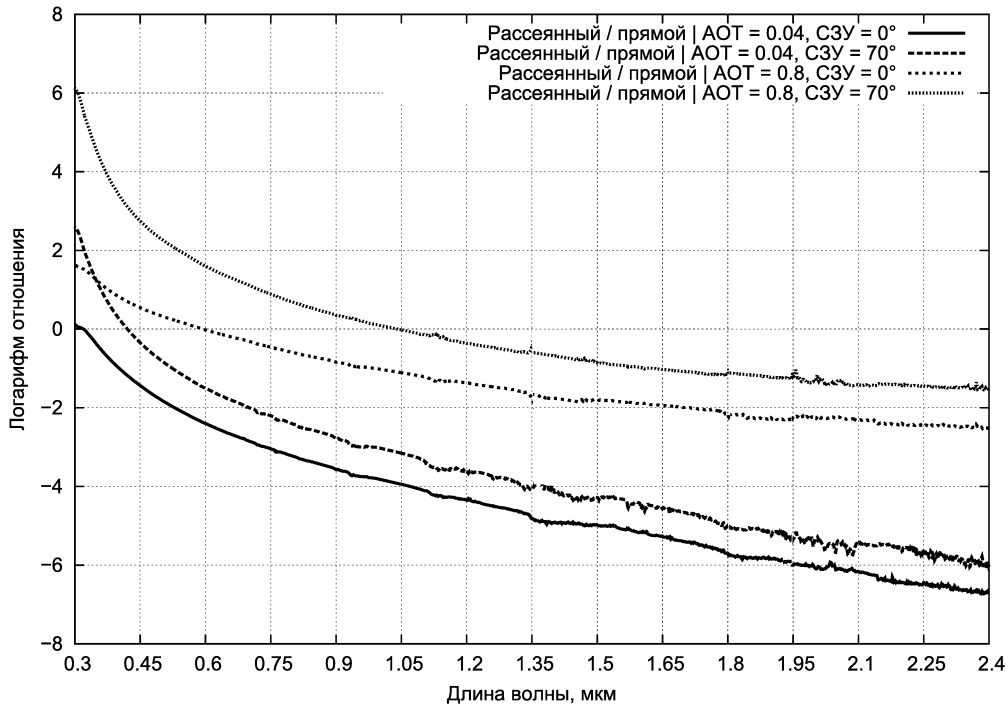


Рис. 2. Логарифм отношения спектров падающих рассеянного и прямого потоков излучения при разных параметрах AOT и СЗУ

дится к аппроксимации этого отношения. Результаты численных экспериментов показали, что зависимость падающего рассеянного излучения от альбедо ПП практически линейна и может быть учтена на финальном этапе аппроксимации.

Поток падающего рассеянного излучения F_{diff} можно записать как

$$F_{diff} = e^{f_0(\lambda, p)} \cdot F_{dir}, \quad (11)$$

где $f_0(\lambda, p)$ — функция преобразования при нулевом альбедо, представляет собой логарифм отношения спектров рассеянного и прямого излучения. На первом этапе необходимо установить вид зависимости ФП от λ . Для этого в MODTRAN рассчитывались спектры падающего прямого и рассеянного излучений при заданных значениях p_i ($p_i = \{\tau_i, \theta_i\}$), затем вычислялись логарифмы их отношений. Таким образом, было получено семейство $f_0(\lambda, k_i)$, для которых подбирался вид аппроксимирующей функции. ФП была разбита на три спектральных участка (0.3-0.5; 0.5-0.9; 0.9-2.4 мкм), которые аппроксимировались полиномами 3, 3 и 2 степеней соответственно. Для каждого из этих участков были рассчитаны значения коэффициентов $k^{(j)}(p_i)$ для всех узлов сетки пространства параметров. По полученным наборам значений коэффициентов $k^{(j)}(p_i)$ аппроксимировались зависимости

$k(p)$ для произвольных значений p двумерным кубическим сплайном вида

$$a_0 + a_1\theta + a_2\tau + a_3\theta\tau + a_4\tau^2 + a_5\theta^2 + a_6\theta\tau^2 + a_7\theta^2\tau + a_8\theta^3 + a_9\tau^3.$$

Примеры зависимостей коэффициентов $k^{(j)}(p_i)$ от АОТ и солнечного зенитного угла приведены на рис. 3

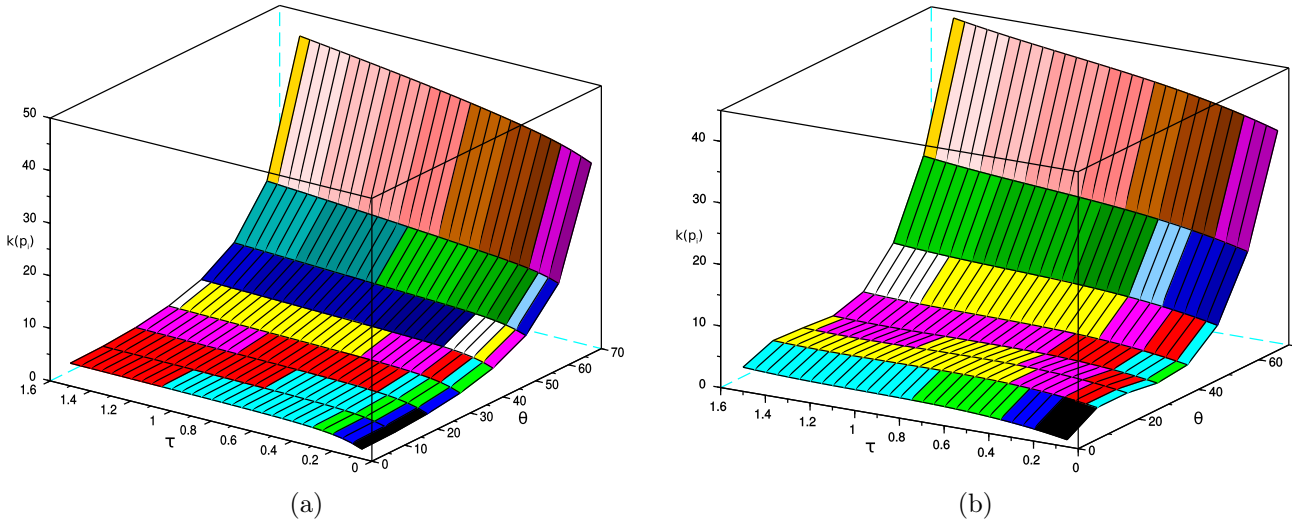


Рис. 3. Зависимость $k^{(1)}(p_i)$ для участка 0.3-0.5 мкм, рассчитанная по результатам аппроксимации функции $f(\lambda, p)$ в узлах сетки (а) и восстановленная после её аппроксимации двумерным кубическим полиномом $k(p)$ (б)

Для учёта влияния альбедо на рассеянное излучение была введена корректирующая функция $k_{fa} = 1 + f_a(a) \cdot f_1(\lambda, p)$, где $f_1(\lambda, p)$ — функция, показывающая долю рассеянного излучения при альбедо $a = 1$, а $f_a(a)$ — функция, в первом приближении линейно зависящая от альбедо и принимающая значение 0 при $a = 0$ и 1 при $a = 1$. Тогда поток падающего рассеянного излучения можно записать в следующем виде:

$$F_{diff} = (1 + f_a(a) \cdot f_1(\lambda, p)) \cdot e^{f_0(\lambda, p)} \cdot F_{dir}. \quad (12)$$

Аппроксимация ФП с учётом альбедо проводилась в два этапа. На первом этапе аппроксимировалась функция $f_1(\lambda, p)$, а на втором оценивалась степень соответствия функции $f_a(a)$ линейной зависимости. Для аппроксимации $f_1(\lambda, p)$, представляющей собой отношение спектров рассеянного излучения при альбедо равном 0 и 1, были проанализированы её зависимости от p . В результате были выделены три спектральных участка ФП: 0.3-0.345, 0.345-0.8 и 0.8-2.4 мкм, которые хорошо описываются полиномами второй, третьей и первой степени соответственно. Затем было построено семейство функций $f_a(a)$ для разных длин волн (рис. 4). Анализ показал, что эти зависимости могут быть с высокой точностью (не более 1%) аппроксимированы квадратичной параболой.

Для восстановления спектрального альбедо ПП в соответствии с итерационной методикой необходимо восстановить спектр интенсивности на ВГА $L_{TOA}(\lambda, w, \tau, \theta, \beta, \phi, a)$. Для упрощения аппроксимации сначала восстанавливались спектры интенсивности на ВГА для граничных значений альбедо L_{TOA0}, L_{TOA1} . На аппроксимируемые спектры накладывалась

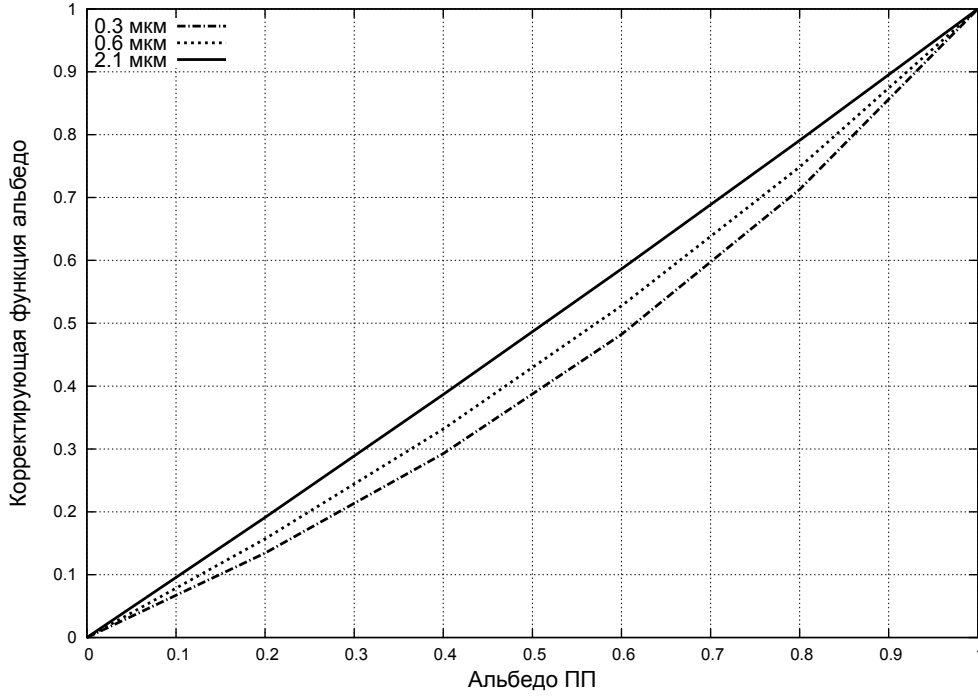


Рис. 4. Корректирующая функция на разных длинах волн

маска с длинами волн $\{0.3-0.4; 0.71-0.73; 0.76-0.77; 0.82-0.84; 0.880-0.990; 1.100-1.200; 1.260-1.530; 1.750-2.100; 2.140-2.400 \text{ мкм}\}$, границы которой выбирались так, чтобы исключить из рассмотрения диапазоны с сильным поглощением, на которых обычно отсутствуют каналы спутниковых приборов. Критериями точности аппроксимации ФП и восстановления искомым спектров служили относительные ошибки и минимаксные критерии.

С помощью MODTRAN были рассчитаны опорные спектры — интенсивности излучения на ВГА с параметрами $(\tau = 0.2, \theta = 30^\circ, \beta = 40^\circ, \phi = 180^\circ, a = 0)$ и $(\tau = 0.2, \theta = 30^\circ, \beta = 40^\circ, \phi = 180^\circ, a = 1)$. ФП были разделены на 3 участка (0.3-0.6, 0.6-1.2, 1.2-2.4 мкм), которые аппроксимировались полиномами 3, 2, 2 степеней, коэффициенты которых зависели от четырёх параметров $(\tau, \theta, \beta, \phi)$. Аппроксимация проводилась по 2800 узлам $(\tau = 0.05, 0.10, 0.15, 0.20, 0.30, 0.40, 0.50, 0.60, 0.70, 0.80, \theta = 0^\circ \dots 70^\circ \text{ с шагом } 10^\circ, \beta = 0^\circ \dots 60^\circ \text{ с шагом } 10^\circ, \phi = 0^\circ \dots 180^\circ \text{ с шагом } 45^\circ)$. На рис. 5 приведены пример восстановления L_{TOA1} и относительной ошибки его восстановления после маскирования.

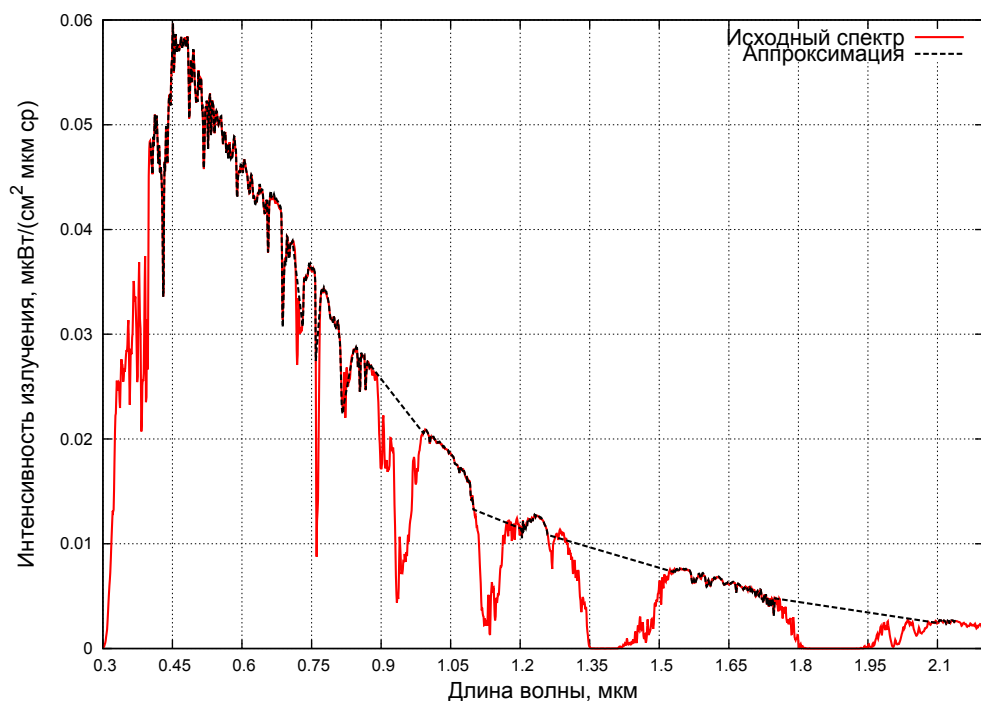
Единственным возможным способом восстановления ФП в произвольной точке p было использование многомерной интерполяции. Коэффициенты аппроксимации ФП были интерполированы кубическими сплайнами с относительными ошибками не более 2%.

Интенсивность излучения на ВГА рассчитывалась в соответствии с выражением:

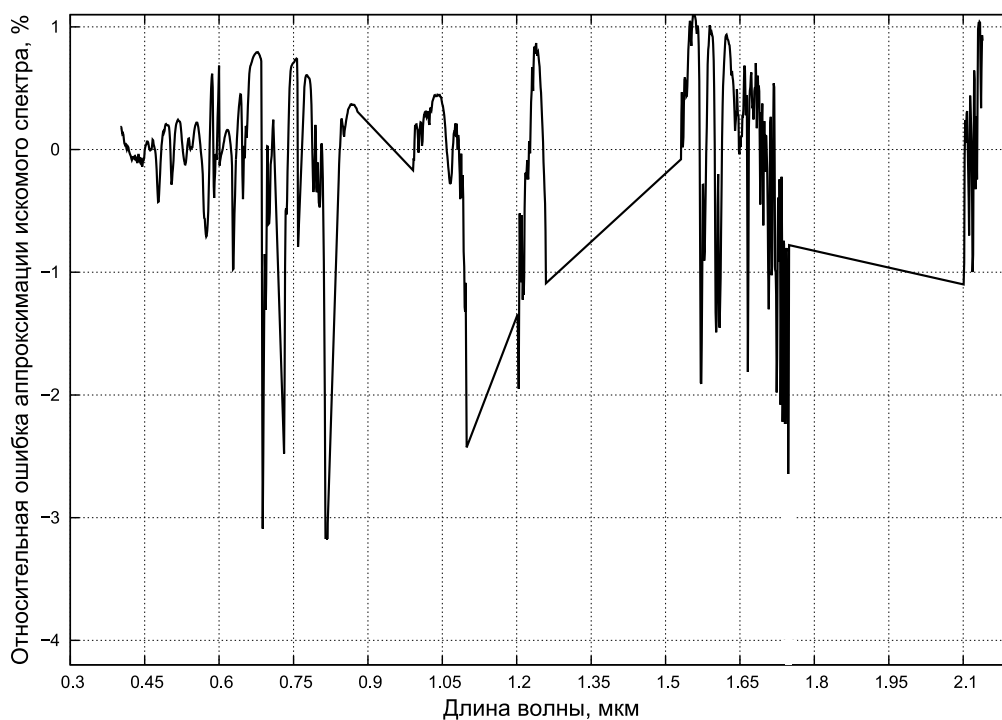
$$L_{TOA} = L_{TOA0} + (L_{TOA1} - L_{TOA0}) \cdot f_a(a), \quad (13)$$

где $f_a(a)$ — функция, зависящая от альбедо и принимающая значения $f_a(1) = 1$ и $f_a(0) = 0$, которая была аппроксимирована квадратичным полиномом $f_a(a) = b_2 a^2 + b_1 a$, $b_1 = 1 - b_2$, $b_2(\lambda) = c_1 \exp(\lambda - \lambda_0) c_2$, $c_1 \approx 0.45$, $c_2 = 5.9407\tau^2 - 11.223\tau + 7.7763$.

Интенсивность в i -м канале спектро радиометра L_i вычислялась с использованием



(a)



(b)

Рис. 5. Пример восстановления $L_{ТОА1}$ для параметров $\tau = 0.5$, $\theta, \beta = 0^\circ$, $\phi = 180^\circ$ (a) и относительная ошибка восстановления с наложенной маской (b)

функции чувствительности этого канала, а по значениям L_i в соответствии с итерационной методикой восстанавливалось спектральное альbedo ПП.

В четвёртой главе представлена программная реализация метода оперативного контроля поглощённой ПП энергии на основе опорных спектров, выполненная с использованием пакета прикладных математических программ Scilab, и его верификация. Программная

реализация включает:

- Интерактивный модуль для выбора и анализа опорных спектров, позволяющий выполнять вычисления со спектральными зависимостями, задавать границы и число участков аппроксимации.
- Программный комплекс для восстановления искомым спектров, состоящий из 3 пар модулей для аппроксимации функций преобразования падающего рассеянного излучения при нулевом альбедо, падающего рассеянного излучения с учётом альбедо, интенсивностей восходящего излучения при нулевом и единичном альбедо. Первый из каждой пары модулей проводит аппроксимацию ФП в узлах сетки пространства параметров, второй — аппроксимацию полученных коэффициентов для произвольных значений параметров атмосферы и условий наблюдения с пошаговым контролем ошибок.
- Программный модуль оперативного контроля поглощённой ПП энергии. Данный модуль представляет собой пакет, содержащий две основные функции, одна из которых выполняет процедуру инициализации (считывание информации из файлов и присвоение значений соответствующим глобальным переменным), а вторая производит требуемые вычисления в соответствии с разработанным алгоритмом.

Верификация метода оперативного контроля поглощённой ПП энергии на основе опорных спектров проводилась на наборе данных SURFRAD, использованном в главе 2. Результат показал, что среднеквадратичное отклонение лежит в пределах 31–41 Вт/м² при относительной погрешности не выше 4.4%. Дополнительно был проведён интервальный анализ рассчитанных и измеренных значений поглощённой ПП энергии. Для этого сравнивались интервалы изменения энергии, рассчитанной по спутниковым данным в 9 точках вблизи наземной станции (9 км²), и значения, непосредственно измеренные на станции в течение 5 минут во время пролёта спутника. Было получено, что, за исключением сцен с разорванной облачностью, эти интервалы (разбросы) перекрывают друг друга. На рис. 6 приведены результаты верификации с использованием интервального анализа за период 2012-2013 гг.

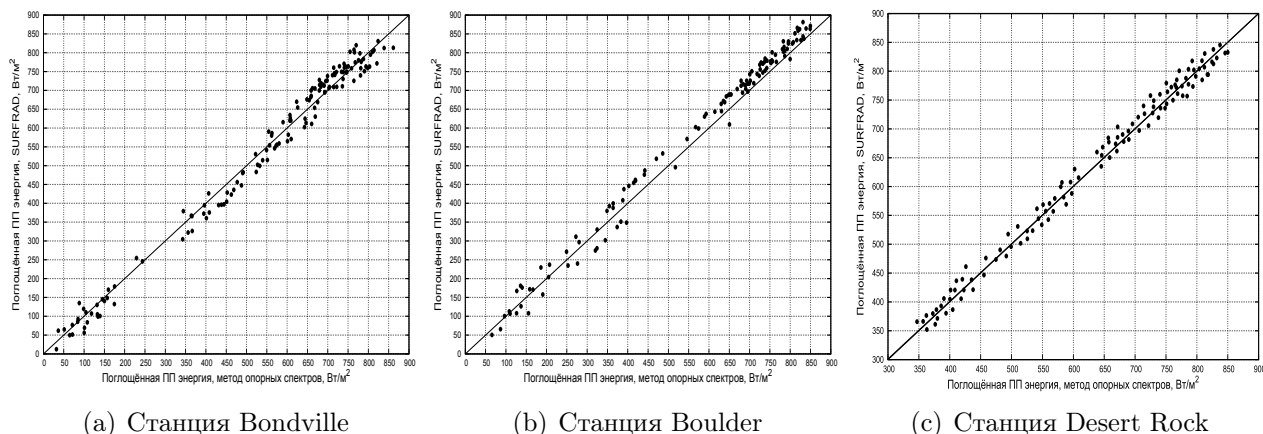


Рис. 6. Верификация с наземными станциями по данным 2012-2013 гг.

Программный модуль был применён в экспериментах по контролю поглощённой ПП энергии с использованием наземных станций наблюдения на территории Республики Алтай, проводимых Институтом водных и экологических проблем СО РАН (г. Барнаул), а также в отделе космического мониторинга и прогнозирования ЧС АлтГУ для контроля поглощённой ПП энергии в реальном времени на территории Западной Сибири.

В заключении приведены основные результаты исследований данной работы.

1. Предложен гибридный метод контроля поглощённой ПП энергии по спутниковым данным на основе спектрального подхода и восстановления спектрального альбеда.
2. Предложена итерационная методика восстановления спектрального альбеда по откликам в каналах спектрорадиометра в оптическом и ближнем ИК диапазонах.
3. Разработан метод контроля поглощённой ПП энергии на основе спектрального подхода и восстановления спектрального альбеда, реализованный с использованием MODTRAN. Проведена его верификация.
4. Предложены метод опорных спектров и методика аппроксимации функций преобразования для восстановления искомым спектров и её программная реализация.
5. Разработаны метод оперативного контроля поглощённой энергии на основе опорных спектров и программный модуль для его реализации. Проведена его верификация.
6. Программный модуль оперативного контроля поглощённой ПП энергии внедрён в отделе космического мониторинга и прогнозирования ЧС АлтГУ и Институте водных и экологических проблем СО РАН.

Основные публикации по теме диссертации

В журналах, входящих в перечень ВАК и индексируемых Scopus:

1. *Yakunin, M.A.* A hybrid method for evaluating absorbed solar energy at the surface level using remote sensing data / M.A. Yakunin // *Journal of Siberian Federal University. Mathematics & Physics.* — 2015. — Vol. 8(2). — Pp. 224-229
2. *Yakunin, M.A.* MODTRAN5 simulations of responses from MODIS spectroradiometer channels / M.A. Yakunin, A.V. Yurchenko // *Technical Physics.* — 2015. — Vol. 60, no. 1. — Pp. 141-144.

В журналах, входящих в перечень ВАК:

3. *Якунин, М.А.* Решение задач контроля радиационного баланса подстилающей поверхности на основе спектрального подхода / М.А. Якунин // *Вестник Ижевского государственного технического университета имени М.Т. Калашникова.* — 2015. — Т.1. — С. 83-84.
4. *Якунин, М.А.* Моделирование откликов каналов спектрорадиометра MODIS в инструментальной среде MODTRAN5 / М.А. Якунин, А.В. Юрченко // *Журнал технической физики.* — 2015. — Т.85, №1. — С. 146-149.

5. Якунин, М.А. Многоточечная система дистанционного мониторинга пространственно-распределённых динамических процессов / Л.И. Сучкова, Х.М. Хуссейн, Р.В. Кунц, М.А. Якунин, А.Г. Якунин, А.В. Юрченко // *Контроль, диагностика*. — 2013. — Т.13. — С. 95-101.
6. Якунин, М.А. Использование маски облачности MOD35 для измерения фрактальной размерности границ облаков и облачных массивов / М.А. Якунин, А.А. Лагутин // *Ползуновский вестник*. — 2010. — Т.2. — С. 108-109.

В других журналах и изданиях:

7. Якунин, М.А. Расчёт количества поглощённой солнечной энергии по данным MODIS. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015614781, заявка 2015611632, дата рег. 28.04.2015. — М.: Роспатент, 2015.
8. Якунин М.А. Масштабируемые программно-технические решения для экологического и технического мониторинга / М.А. Якунин, Х.М. Хуссейн, Л.И. Сучкова, А.Г. Якунин // *Ползуновский альманах*. — 2013. — Т.1. — С. 75-82.
9. Yakunin, M.A. Ways for improving methods of data sorting in monitoring systems / М.А. Yakunin, H. Hussein, L.I. Suchkova // *Ползуновский альманах*. — 2012. — Vol. 2. — Pp. 48-50.
10. Якунин, М.А. Фрактальная размерность облаков по данным MODIS / М.А. Якунин, А.А. Лагутин // *Геоинформатика: технологии, научные проекты. Тезисы II международной конференции*. — 2010. — С. 229-232.
11. Якунин, М.А. Программный комплекс оперативного мониторинга количества поглощённой солнечной энергии подстилающей поверхностью по данным MODIS/Terra / М.А. Якунин // *Информационно-измерительная техника и технологии: сборник материалов III Научно-практической конференции*. — 2012. — С. 19-22.
12. Якунин. М.А. Мониторинг радиационного баланса подстилающей поверхности по данным спутниковых наблюдений и результатам моделирования / М.А. Якунин, А.А. Лагутин // *Аэрозоли Сибири. XIX Рабочая группа: тезисы докладов*. — 2012. — С. 52.
13. Якунин, М.А. Моделирование показаний спектрорадиометра MODIS: результаты MODTRAN5 / М.А. Якунин, А.А. Лагутин // *Аэрозоли Сибири: Юбилейная XX Рабочая группа: тезисы докладов*. — 2013. — С. 58.
14. Якунин, М.А. Применение гибридного подхода для восстановления количества солнечной энергии на уровне подстилающей поверхности / М.А. Якунин // *Аэрозоли Сибири. XXI Рабочая группа: тезисы докладов*. — 2014. — С. 37.
15. Якунин, М.А. Моделирование показаний спектрорадиометра MODIS и оценка влияния характеристик атмосферы и подстилающей поверхности / М.А. Якунин // *Дистанционное зондирование Земли из космоса: алгоритмы, технологии, данные. Материалы молодёжной школы-семинара*. — 2013. — С. 99-108.
16. Якунин М.А. Автоматизированный оперативный комплекс восстановления радиа-

- ционного баланса коротковолнового излучения подстилающей поверхности Сибирского региона по данным спутникового мониторинга / М.А. Якунин, А.А. Лагутин // *Сборник тезисов докладов Двенадцатой Всероссийской открытой конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса.»* — 2014.
17. Якунин, М.А. Программно-технические и алгоритмические решения для систем многоточного климатического и экологического мониторинга / М.А. Якунин, Л.И. Сучкова, Х.М. Хуссейн, А.Г. Якунин // *Сборник трудов II Всероссийской с международным участием научно-практической конференции по инновациям в неразрушающем контроле SibTest.* — 2013. — Т.13. — С. 185-195.
18. Yakunin, M.A. Lighting monitoring and its application in the radiation balance research / М.А. Yakunin, А.Г. Yakunin, L.I. Suchkova, H.M. Hussein // *Материалы 14 Международной конференции «Измерение, контроль, информатизация».* — 2013. — С. 24-27.

Якунин Максим Алексеевич

**КОНТРОЛЬ ПОГЛОЩЁННОЙ ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ
СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВОГО
МОНИТОРИНГА НА ОСНОВЕ СПЕКТРАЛЬНОГО ПОДХОДА**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Оригинал-макет подготовлен и отпечатан в пакете $\LaTeX 2\epsilon$

Подписано к печати 31.05.2016
Формат 60 × 84/16
Печать офсетная
Усл. печ. л. 1.
Тираж 100 экз.

Заказ 151

Распространяется бесплатно

Типография при ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный университет»
656049, г. Барнаул, пр-т Ленина, 61
