

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Алтайский государственный университет»

На правах рукописи

Якунин Максим Алексеевич

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

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

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор физико-математических
наук, профессор А. А. Лагутин

Барнаул — 2016

Содержание

ВВЕДЕНИЕ	4
Глава 1. ПРОГРАММНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ И МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СПУТНИКОВОГО МОНИТОРИНГА ПОГЛОЩЁННОЙ ПП ЭНЕРГИИ	13
1.1. Необходимость использования спутниковых данных с высоким пространственным разрешением	13
1.2. Возможности программного комплекса MODTRAN как моделирующего инструмента	17
1.3. Современные методы контроля поглощённой ПП энергии . .	19
1.4. Гибридный метод контроля поглощённой ПП энергии	24
Выводы	30
Глава 2. МЕТОД КОНТРОЛЯ ПОГЛОЩЁННОЙ ПП ЭНЕРГИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ MODTRAN	31
2.1. Оценка влияния параметров атмосферы, ПП и условий наблюдения на исследуемые спектры	31
2.2. Входные и выходные файлы MODTRAN	33
2.3. Итерационная методика восстановления спектрального альбедо и её сравнительная валидация	36
2.4. Расчёт спектра падающего на ПП излучения	42
2.5. Алгоритм восстановления поглощённой ПП энергии и его реализация	43
2.6. Верификация разработанного метода	44
Выводы	48
Глава 3. ОПЕРАТИВНЫЙ КОНТРОЛЬ ПОГЛОЩЁННОЙ ПП ЭНЕРГИИ НА ОСНОВЕ ОПОРНЫХ СПЕКТРОВ	49
3.1. Метод опорных спектров	49
3.1.1. Опорные спектры	49
3.1.2. Аппроксимация функций преобразования	50
3.2. Восстановление спектра прямого падающего излучения . . .	56
3.3. Восстановление спектра падающего рассеянного излучения .	61
3.3.1. Выбор опорного спектра	61

3.3.2.	Расчёт спектра падающего рассеянного излучения при нулевом альбедо	66
3.3.3.	Расчёт спектра падающего рассеянного излучения с учётом альбедо	69
3.4.	Восстановление спектрального альбедо ПП	75
3.4.1.	Алгоритм восстановления спектрального альбедо ПП	75
3.4.2.	Восстановление спектров интенсивности на ВГА при нулевом и единичном альбедо	76
3.4.3.	Восстановление спектрального альбедо ПП	80
	Выводы	83
 Глава 4. ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДА ОПЕРАТИВНОГО КОНТРОЛЯ ПОГЛОЩЁННОЙ ПП ЭНЕРГИИ		84
4.1.	Программный комплекс для аппроксимации функций преобразования и восстановления искомым спектров	84
4.2.	Программный модуль для практической реализации метода оперативного контроля поглощенной ПП энергии	91
4.3.	Верификация и практическое применение разработанного метода	95
	Выводы	99
 ЗАКЛЮЧЕНИЕ		100
 Приложение А. Сцены MODIS для верификации		102
 Приложение Б. Коэффициенты аппроксимации функции преобразования падающего рассеянного потока излучения		103
 Приложение В. Акты и свидетельства		107
 Литература		110

ВВЕДЕНИЕ

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 [1–10].

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 [11–15].

Приборы, вынесенные на спутниковые платформы, позволяют проводить мониторинг больших территорий [13, 16–30]. 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°) [13, 24] и ISCCP (280 км) [17, 21]. В настоящее время в основном используются данные высокого пространственного разрешения 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 спектрометра, 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) [13, 20, 22, 24–30]. Попытки применить их на других территориях не подтверждают указанные в них погрешности [25, 26, 31]. Эти результаты можно объяснить использованием стандартных наборов альbedo ПП и ограниченного 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 [14, 32–39]. 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 MODTRAN5.2.1 или опорных спектров [40–42]. Такой метод не связан с конкретными спутниковыми платформами, каналами спектро-радиометра и территориями.

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

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

1. Итерационная методика восстановления спектрального альbedo по откликам в каналах спектрорадиометра в оптическом и ближнем инфракрасном диапазонах.
2. Метод контроля поглощённой ПП энергии на основе спектрального подхода и восстановления спектрального альbedo, реализованный с исполь-

зованием MODTRAN5.2.1.

3. Метод опорных спектров и методика аппроксимации функций преобразования для восстановления искомым спектров.

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.

Объектом исследования являются спектральные зависимости потоков и интенсивностей излучения при вариациях параметров атмосферы, ПП и условий наблюдения.

Предмет исследования — методы контроля поглощённой ПП солнечной энергии.

Данная область исследований соответствует следующим пунктам паспорта специальности ВАК 05.11.13: п.1. «научное обоснование новых и усовершенствование существующих методов аналитического и неразрушающего контроля природной среды, веществ, материалов и изделий», п.4. «разработка методического, технического, приборного и информационного обеспечения для локальных, региональных и глобальных систем экологического мониторинга природных и техногенных объектов», п.6. «разработка алгоритмического и программно-технического обеспечения процессов обработки информативных сигналов и представление результатов в приборах и средствах контроля».

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 ат-

мосфере излучения. Для обработки результатов моделирования использовались авторские программы, разработанные на языке 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 альbedo 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 преоб-

разования для восстановления спектров потоков и интенсивностей излучения на уровне подстилающей поверхности и верхней границы 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 контроля поглощённой ПП энергии внедрён в отделе космического мониторинга и прогнозирования ЧС АлтГУ, а также в Институте водных и экологических проблем СО РАН.

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 «Аэро-

золи 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.

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, разработка метода контроля поглощённой ПП энергии с использованием MODTRAN и его верификация по данным наземных станций SURFRAD, разработка метода опорных спектров с аппроксимацией функций преобразования для восстановления искомым спектров, разработка метода оперативного контроля поглощённой ПП энергии на обширных территориях на основе опорных спектров, разработка программного комплекса для расчёта коэффициентов аппроксимации функций преобразования, разработка программного модуля оперативного контроля поглощённой ПП энергии на основе опорных спектров и его верификация, а также разработка программного интерфейсного модуля для исследования спектральных зависимостей и выбора опорных спектров вы-

полнены автором самостоятельно.

Публикации. Результаты диссертационного исследования представлены в 18 печатных работах [36, 40–56], 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» [57].

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.

Во введении обосновывается актуальность, определяются цель и задачи исследования. Представлена научная новизна и практическая ценность диссертации, приводятся положения, выносимые на защиту, обсуждается обоснованность и достоверность научных положений и выводов диссертационной работы, даётся информация о вкладе автора и апробации результатов работы. Кратко излагается содержание работы.

В первой главе обсуждается программно-техническое и методическое обеспечение разрабатываемых методов контроля поглощённой ПП энергии по спутниковым данным (MODIS/Terra). Обосновывается необходимость использования спутниковых данных с высоким пространственным разрешением. Анализируются возможности программного комплекса MODTRAN как моделирующего инструмента. Рассматриваются современные методы контроля поглощённой ПП энергии и их результаты. Предлагается гибридный метод контроля поглощённой ПП энергии по спутниковым данным на основе спектрального подхода и восстановления спектрального альбедо, анализируются факторы, влияющие на его точность.

Вторая глава посвящена разработке метода контроля поглощённой ПП энергии по спутниковым данным на основе спектрального подхода и восста-

новлении спектрального альбедо ПП с использованием программного комплекса MODTRAN5.2.1. На основании результатов вычислительных экспериментов устанавливаются параметры атмосферы и условий наблюдения, влияющие на исследуемые спектральные зависимости ($> 2\%$). Излагается итерационная методика восстановления спектрального альбедо и результаты её сравнительной валидации. Разрабатывается алгоритм восстановления поглощённой ПП энергии с использованием MODTRAN и соответствующий программный модуль обработки спутниковых данных. Представлена методика верификации метода по данным сети наземных станций SURFRAD и её результаты.

Третья глава посвящена разработке метода оперативного контроля поглощённой ПП энергии на обширных территориях с использованием опорных спектров. Представлен метод опорных спектров и методика аппроксимации функций преобразования для восстановления искомым спектров. Рассчитаны коэффициенты аппроксимации функций преобразования с пошаговым контролем ошибок на каждом этапе вычислений. Получены аналитические выражения для всех искомым спектров: потоков прямого и рассеянного падающего излучения и интенсивности излучения на ВГА для восстановления спектрального альбедо ПП.

В четвёртой главе представлены разработанные: программный комплекс для нахождения коэффициентов аппроксимации функций преобразования, необходимых для восстановления искомым спектров, программный модуль для оперативного контроля поглощённой ПП энергии по спутниковым данным на основе опорных спектров, интерфейсный программный модуль для анализа спектральных зависимостей и выбора опорных спектров. Проведена верификация предложенного метода и сравнительная валидация с другими продуктами. Представлены полученные результаты. Приводятся примеры внедрения разработанного программного модуля для оперативного контроля поглощённой ПП энергии.

В заключении представлены основные результаты работы.

В приложении А приведены данные (дата и время) спутниковых сцен, использованных при верификации.

В приложении Б приведены коэффициенты аппроксимации потока падающего рассеянного излучения.

В приложении В приведены акты использования результатов диссертационных исследований и полученное свидетельство о государственной регистрации программы ЭВМ.

Глава 1

ПРОГРАММНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ И МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СПУТНИКОВОГО МОНИТОРИНГА ПОГЛОЩЁННОЙ ПП ЭНЕРГИИ

1.1. Необходимость использования спутниковых данных с высоким пространственным разрешением

Большая часть исследований последних десятилетий была сфокусирована на обработке спутниковых данных низкого пространственного разрешения, полученных в результате глобальных экспериментов 80-90-х годов, таких как ERBE (2.5°) [13, 24] и ISCCP (280 км) [17, 21]. Методы восстановления потоков излучения, приходящих на ПП, на обширных территориях всегда связаны с обработкой данных с неоднородных областей [55, 56]. Использование спутниковых данных низкого пространственного разрешения в этих методах приводит к ошибкам, которые крайне сложно оценить. (Наземных же способов точного измерения потоков излучения у ПП на больших и неоднородных областях не существует.) Поэтому методы контроля поглощённой ПП энергии, использующие данные низкого пространственного разрешения, непригодны для решения современных климатических задач, таких как моделирование экосистем, энергетического баланса, климата и различных нелинейных процессов, протекающих на ПП [58–65]. Для таких приложений необходимо использование данных с пространственным разрешением не ниже 10 км [26, 38]. Таким образом, именно высокое пространственное разрешение спутниковых данных определяет их информа-

тивность, играет решающую роль в обеспечении точности контролируемых параметров и расширяет функциональные возможности применения разрабатываемых методов контроля поглощённой ПП энергии.

В настоящее время на орбите Земли находится большое количество спутниковых приборов, проводящих непрерывный контроль различных параметров атмосферы и ПП. Для реализации предложенного метода контроля поглощённой ПП энергии необходимо, чтобы среди продуктов выбранной спутниковой системы были следующие: интенсивность восходящего излучения, регистрируемого рядом спектральных каналов в исследуемом коротковолновом диапазоне (0.3-2.4 мкм), геометрия сканируемой сцены, аэрозольная оптическая толщина (АОТ), полное содержание водяного пара в столбе атмосферы. Существует ряд спутниковых приборов, позволяющих восстанавливать перечисленные параметры в высоком пространственном разрешении. К ним относятся, например, спектрорадиометры MODIS на спутниках NASA Terra и Aqua и радиометр VIIRS, расположенный на спутнике Suomi NPP.

MODIS — сканирующий спектрорадиометр среднего разрешения, расположенный на борту спутников Terra и Aqua, запущенных NASA по программе Earth Observing System в 1999 и 2004 годах соответственно. Эти спутники летают на низких полярных солнечно-синхронных орбитах на высоте 705 км над Землёй и совершают 16 витков в день [66–68]. Систематические наблюдения Aqua и Terra помогают понять ежедневный цикл ключевых параметров атмосферы. В таблице 1.1 приведены основные характеристики орбиты Terra.

Спектрорадиометр MODIS регистрирует излучение в диапазоне длин волн 0,4 – 14,4 мкм при помощи 36 спектральных каналов: 20 из них принимают данные в оптическом диапазоне, 16 — в тепловом. Область обзора прибора составляет 2330 км в направлении, перпендикулярном движению спутника, а разрешающая способность на местности в надире — 250 м (ка-

Таблица 1.1

Характеристики орбиты спутника Terra [67]

Высота, тип	705 км, солнечно-синхронная
Наклон	98.3° от плоскости экватора
Период обращения:	98.88 минут
Пересечение экватора:	10:30 (с севера на юг)
Период повторения:	16 дней (233 витка)

налы 1 и 2), 500 м (каналы 3-7), и 1000 м (каналы 8-36) [69–71]. В таблице 1.2 приведены спектральные диапазоны оптических каналов MODIS.

Таблица 1.2

Оптические каналы MODIS [67]

№ канала	Диапазон, нм	№ канала	Диапазон, нм
1	620-670	11	526-536
2	841-876	12	546-556
3	459-479	13	662-672
4	545-565	14	673-683
5	1230-1250	15	743-753
6	1628-1652	16	862-877
7	2105-2155	17	890-920
8	405-420	18	931-941
9	438-448	19	915-965
10	483-493	26	1360-1390

VIIRS представляет собой 22-канальный сканирующий радиометр на борту спутника Suomi NPP, который был выведен на орбиту в 2011 г. Данные VIIRS используются для изучения свойств облаков и аэрозолей, цвета океана, температуры земной поверхности, передвижений и температуры льда, детектирования пожаров и измерения альбедо поверхности Земли, а так же для изучения глобальных изменений климата [72]. Краткие характеристики прибора представлены в таблице 1.3.

Данные MODIS и VIIRS могут быть получены из открытых серверов NASA с некоторой задержкой [73] либо в режиме реального времени в Цен-

Таблица 1.3

Характеристики сканирующего радиометра VIIRS [72]

Спектральные каналы	22
Видимый/Ближний ИК	10 (включая панхроматический)
Средний ИК	8
Дальний ИК	4
Спектральный диапазон	0.45-12.0 мкм
Пространственное разрешение	375 - 750 м
Ширина полосы сканирования	3000 км
Частота съёмки	1-2 раза в сутки

тре космического мониторинга и прогнозирования ЧС АлтГУ [74], где принятый станцией «сырой» поток данных проходит процедуру распаковки, географической привязки и обработки. В ходе этой процедуры создаются тематические продукты, содержащие необходимую информацию.

В настоящей работе используются следующие продукты MODIS:

- MOD021km — интенсивности в каналах спектро радиометра;
- MOD03 — данные геопривязки и геометрии спутниковой сцен;
- MOD04_L2 / MOD04_3KM — АОТ;
- MOD05 — полное содержание водяного пара в столбе атмосферы;
- MOD35_L2 — маска облачности;
- MCD43B3 — 8-дневное альбе до ПП.

Они имеют пространственное разрешение до 1 км за исключением аэрозольной оптической толщины, которая предоставляется с разрешением 10 км (или 3 км в данных, полученных с применением 6-ой версии алгоритма обработки [75, 76]), и хранятся в отдельных hdf-файлах. Для работы с файлами в формате hdf был разработан специальный программный пакет, осуществляющий быстрый поиск и экспорт необходимых данных.

1.2. Возможности программного комплекса MODTRAN как моделирующего инструмента

При разработке метода контроля поглощённой ПП энергии по спутниковым данным решаются задачи восстановления спектров потоков излучения на ПП и ВГА. Для их восстановления можно использовать готовые моделирующие программные комплексы, которые позволяют производить расчёты интенсивностей и/или потоков излучения при заданных параметрах состояния атмосферы и геометрии наблюдения, а также моделировать показания спутниковых приборов при заданных функциях чувствительности спектрометрической аппаратуры. Примерами таких программных комплексов могут служить LBLRTM [77], 6SV1 [78, 79], MOSART [80], AETHER [81], MODTRAN [82].

В данной работе для восстановления и анализа спектральных зависимостей излучений используется программный комплекс MODTRAN5.2.1 (MODerate resolution atmospheric TRANsmission), разработанный и поддерживаемый Исследовательской лабораторией ВВС США совместно со Spectral Science, Inc с 1987 г. Он является стандартным средством для расчёта переноса излучения в диапазоне 0.2 – 100 мкм. В MODTRAN5.2.1 используется спектроскопическая база данных HITRAN2008 с последними обновлениями от 2009 года. Спектральное разрешение составляет 15 см^{-1} , 5 см^{-1} , 1 см^{-1} и 0.1 см^{-1} . К характерным особенностям MODTRAN5.2.1 можно отнести:

- использование спектра солнечного излучения с разрешением 0.1 см^{-1} ;
- использование метода дискретных ординат для учёта многократного рассеяния (DISORT [83]);
- использование метода k -распределения [84] для расчёта распространения излучения в атмосфере;
- 10 моделей аэрозоля и дымки, а также пользовательская модель с возможностью задания до 4 вертикальных слоёв аэрозоля с различ-

ными свойствами;

- 13 моделей облачности, а также возможность самостоятельно задавать параметры облачности (толщину, строение, состав, массовое распределение капель);
- 6 моделей атмосферы с возможностью задания произвольного состава атмосферы;
- большая база данных спектральных свойств ПП с возможностью задания поверхности с произвольными значениями спектрального альбедо;
- гибкая возможность регулирования точности расчётов, что позволяет производить быстрые оценочные вычисления.

MODTRAN позволяет рассчитывать:

- функцию пропускания атмосферы и её компоненты;
- интенсивность теплового и коротковолнового излучения на ВГА;
- падающий и восходящий потоки излучения на разных высотах;
- компоненты потоков и интенсивностей излучения: падающие прямой и рассеянный потоки, восходящую отражённую и рассеянную интенсивность на ВГА;
- отклики каналов спутниковых приборов по заданным функциям чувствительности.

Программный комплекс MODTRAN прошёл серию валидаций и тестов в Исследовательской лаборатории ВВС США (AFRL) и независимыми исследователями [85–87]. Установленная погрешность потоков излучения, восстановленных с его помощью, не превышает 2% [82, 88]. В данной работе MODTRAN используется для расчёта исследуемых спектральных зависимостей при различных вариациях параметров атмосферы, ПП и условий наблюдения, при восстановлении откликов в каналах спектрорадиометра MODIS и восстановлении поглощённой ПП энергии.

1.3. Современные методы контроля поглощённой ПП энергии

В последние десятилетия было разработано много прикладных методов для расчёта поглощённой ПП энергии и восстановления радиационного баланса Земли по данным спутникового мониторинга различной степени сложности: от простых статистических и эмпирических до физико-теоретических [19].

Одной из самых ранних работ по глобальному исследованию радиационного баланса Земли с использованием данных дистанционного зондирования является работа [16] 1971 года, в которой были приведены результаты измерений радиационного баланса Земли и усреднённого планетарного альбеда при помощи метеорологических спутников США TIROS, ESSA и Nimbus за период 1962-1966 гг. Результатами этой работы стало уточнение значения среднего планетарного альбеда (30%) и полного радиационного баланса Земли. В этой работе использовалась простая модель радиационного баланса:

$$RN = I_0(1.0 - A) - W_L, \quad (1.1)$$

где RN — радиационный баланс, I_0 — падающий солнечный поток на ВГА, A — планетарное альбеда, W_L — тепловое излучение системы «атмосфера - ПП» (здесь и далее в этом параграфе сохранены оригинальные обозначения величин цитируемых работ).

В 1975 г. NASA был запущен масштабный проект по исследованию радиационного баланса Земли, получившей название The Earth Radiation Budget Experiment (ERBE) [89–92]. В рамках этого проекта в 1984-1986 гг. был запущен ряд спутников (ERBS, NOAA 9 и NOAA 10). Результатами этого эксперимента стали наборы глобальных данных о радиационном балансе Земли, поглощённой и излучаемой энергии, а также альбеда ПП с пространственным разрешением 250 км. Отдельным результатом являлось получение данных о суточном цикле коротковолновых и длинноволновых потоков излучения [93], на основании которых был разработан ряд мето-

дов восстановления поглощённой ПП энергии по уходящему излучению на ВГА [18, 24].

Следом за ERBE последовал другой глобальный спутниковый климатический проект — International Satellite Cloud Climatology Project (ISCCP). Одним из результатов, полученных в рамках этого проекта, стала глобальная база данных радиационного баланса за период 1983-2007 гг, которая была представлена с пространственным разрешением 280 км [94].

Среди отечественных проектов по контролю радиационного баланса можно выделить проект, основанный на использовании аппаратуры спутникового комплекса «Метеор-М» №1 [95, 96], однако пространственное и временное разрешение этих данных не удовлетворяет установленным требованиям.

Исходя из необходимости использования спутниковых данных с высоким пространственным разрешением (до 10×10 км²) в настоящее время разрабатываются методы контроля поглощённой ПП энергии, реализующие различные подходы. Один из них основан на классическом определении поглощённой энергии как доли падающего излучения [97, 98]:

$$F_a = F_s(1 - A_s), \quad (1.2)$$

где $A_s = F_r/F_s$ — альbedo поверхности, F_r — отражённый поток излучения, F_s — падающий поток излучения. Сложность этого подхода заключается в том, что для него необходимо знать актуальное значение альbedo ПП [19, 29, 31, 99–101].

Другой подход подразумевает расчёт поглощённой на ПП энергии по данным измерения интенсивности уходящего излучения на ВГА. Первые попытки напрямую связать потоки излучения на ВГА с потоками на поверхности были предприняты в работе [22], где было установлено, что полное уходящее излучение на ВГА по данным полярно-орбитального спутника NOAA 5 и наблюдаемые/моделируемые потоки энергии у ПП коррелируют. В работе [20] на основе моделирования распространения излучения

в атмосфере для различных типов ПП и состояния атмосферы было показано, что соотношение между потоками энергии на ВГА и ПП сохраняет линейный характер при разных значениях солнечного зенитного угла за исключением случаев, когда этот угол очень велик. Важность такого линейного соотношения для восстановления поглощённой энергии была подтверждена и в работе [12], где были сопоставлены единовременные и пространственно совмещённые измерения пиранометров со станции наземного наблюдения в г. Боулдер, Колорадо и спутниковые данные ERBS. Показано, что модель, основанная на линейном соотношении двух потоков, довольно точно восстанавливает количество поглощённой ПП энергии при безоблачном небе для определённого типа поверхности.

Дальнейшее развитие данного подхода привело к появлению первых параметризаций линейного соотношения потоков энергии на ВГА и ПП с использованием моделей радиационного переноса (LOWTRAN, MODTRAN). В [13] было предложено соотношение, связывающее коэффициент спектральной яркости (КСЯ) на ВГА r с долей падающего излучения a_s , поглощённого ПП, как

$$a_s = \alpha(\mu, p) - \beta(\mu, p)r. \quad (1.3)$$

Здесь μ — косинус солнечного зенитного угла, p — полное содержание водяного пара в атмосфере. Проведённые независимые эксперименты [13] показали, что предложенная параметризация позволяют восстанавливать количество поглощённой солнечной энергии для разных типов ПП с приемлемой точностью.

В работе [25] была разработана модель для восстановления количества поглощённой ПП солнечной энергии по данным спектрорадиометра MODIS/Terra, основанная на линейном соотношении (1.3). Поглощённая ПП энергия E вычислялась по формуле

$$E = \frac{a_s E_0 \mu}{d^2}, \quad (1.4)$$

где E_0 — количество падающей на ВГА солнечной энергии (солнечная постоянная), d — расстояние от Солнца до Земли в астрономических единицах. Коэффициенты α и β были получены в результате моделирования распространения излучения в атмосфере:

$$\alpha = 1 - a_1\mu^{-1} - a_2\mu^{-x} - (1 - \exp(-\mu))(a_3 + a_4w^y)\mu^{-1} \quad (1.5)$$

$$\beta = (1 + a_5 + a_6\ln(\mu) + a_7w^z). \quad (1.6)$$

Здесь w — полное содержание водяного пара в столбе атмосферы, $a_1 - a_7$, x , y , z — константы, характеризующие разные типы подстилающей поверхности. КСЯ r на ВГА рассчитывался по величинам КСЯ в ρ_i каналах спектрорадиометра MODIS (i — номер канала), по формуле:

$$r = b_0 + b_1\rho_1 + b_2\rho_2 + b_3\rho_3 + b_4\rho_4 + b_5\rho_5 + b_6\rho_6 + b_7\rho_7. \quad (1.7)$$

Коэффициенты b_i были получены из параметризации угловой зависимости КСЯ от зенитного угла наблюдения следующим образом:

$$b_i = c_{1i} + c_{2i}/(1 + \exp(1/\cos(VZA) - c_{3i})/c_{4i}), \quad (1.8)$$

где VZA — зенитный угол наблюдения, c_i — коэффициенты, зависящие от относительного азимутального угла и зенитного угла Солнца.

Эта модель прошла валидацию по данным станций наземного наблюдения в Китае. Результаты валидации показали, что среднеквадратичное отклонение величины поглощённой солнечной энергии не более 20 Вт/м^2 для безоблачной и не более 35 Вт/м^2 для облачной атмосферы [25]. Указано также, что причиной погрешности может являться несоответствие пространственных и временных масштабов при сопоставлении спутниковых и наземных данных.

Дальнейшее развитие этот метод получил в работе [26], где был предложен новый подход к восстановлению поглощённой ПП энергии. Этот подход подразумевает одновременное восстановление поглощённой ПП энергии S_n

двумя способами. Первый заключается в расчёте падающего на ПП потока излучения S_{\downarrow} , а затем восстановлении поглощённой энергии с использованием альбедо ПП. Второй способ подразумевает непосредственное восстановление количества поглощённой энергии S_n по КСЯ в каналах MODIS посредством множественной линейной регрессии:

$$S_{\downarrow}(\theta_0, \theta, \phi) = A_{\theta_0, \theta, \phi} + \sum_{i=1}^7 B_{i, \theta_0, \theta, \phi} \cdot \rho_{TOA i, \theta_0, \theta, \phi} \quad (1.9)$$

$$S_n(\theta_0, \theta, \phi) = a_{\theta_0, \theta, \phi} + \sum_{i=1}^7 b_{i, \theta_0, \theta, \phi} \cdot \rho_{TOA i, \theta_0, \theta, \phi} + \sum_{i=1}^7 c_{i, \theta_0, \theta, \phi} \cdot \rho_{S_i, \theta_0, \theta, \phi}. \quad (1.10)$$

Здесь θ_0 — солнечный зенитный угол, θ — зенитный угол наблюдения, ϕ — относительный азимутальный угол сенсора и Солнца, $A_{\theta_0, \theta, \phi}$, $B_{i, \theta_0, \theta, \phi}$, $a_{\theta_0, \theta, \phi}$, $b_{i, \theta_0, \theta, \phi}$ и $c_{i, \theta_0, \theta, \phi}$ — регрессионные коэффициенты множественной регрессии, i — номер канала спектрорадиометра, $\rho_{TOA i, \theta_0, \theta, \phi}$ и $\rho_{S_i, \theta_0, \theta, \phi}$ — КСЯ на ВГА и у ПП соответственно.

Регрессионные коэффициенты были получены для фиксированных значений количества водяного пара и высоты поверхности над уровнем моря. Поглощённая энергия, восстановленная по этим коэффициентам, затем корректировалась в соответствии с фактическими значениями водяного пара и высоты на величины C_w и T_n :

$$C_w = \frac{T_w}{T_{wd}}; \quad (1.11)$$

$$T_n = \frac{T_z}{T_0}. \quad (1.12)$$

Здесь T_w — коэффициент пропускания атмосферы для водяного пара, взятого по умолчанию, T_{wd} — коэффициент пропускания, вычисленный для фактического значения водяного пара, T_z и T_0 — коэффициенты пропускания слоя атмосферы, обусловленные рассеянием Релея на высоте z и на уровне моря.

Авторы [26] утверждают, что такой подход позволяет избежать использования набора данных разного пространственного разрешения и в целом повысить точность восстановления поглощённой энергии.

Данный метод также прошёл валидацию по данным сети станций наземного наблюдения SURFRAD, расположенных в США. Результаты валидации показали, что среднеквадратичное отклонение восстановления поглощённой ПП энергии составляет $93,8 \text{ Вт/м}^2$.

подавляющее большинство работ последних лет по восстановлению количества поглощённой солнечной энергии (в том числе и вышеперечисленные) основаны на использовании данных конкретных спутниковых платформ и каналов спектрорадиометров и полученных с помощью MODTRAN параметризациях [27–30, 102]. Однако все они демонстрируют значительный разброс в полученных результатах.

1.4. Гибридный метод контроля поглощённой ПП энергии

Предлагаемый в данной работе гибридный метод контроля поглощённой ПП энергии на основе спектрального подхода должен отвечать следующим требованиям [40]:

- обеспечивать высокую точность контроля поглощённой ПП энергии на обширных территориях;
- адаптироваться к различным спутниковым платформам, каналам спектрорадиометра и регионам;
- иметь два способа реализации: с использованием MODTRAN и опорных спектров.

Проанализируем реализацию этих требований в соответствующей последовательности.

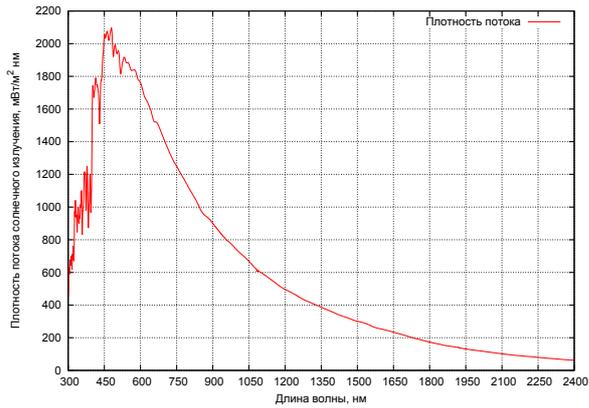
Инструментальное и методическое обеспечение точности гибридного метода. Современные средства и методы контроля поглощённой ПП энергии независимо от подхода её восстановления не обеспечива-

ют высокой точности, необходимой для большинства современных приложений, связанных с моделированием процессов на ПП и решением задач прогнозирования климата на региональных и глобальных уровнях. Рассмотрим факторы, влияющие на точность контроля. Важнейшим из них является достоверность и информативность используемых данных, полученных со спутниковых платформ, моделирующих программных комплексов и вычислительных экспериментов, наземных станций контроля. Для обеспечения достоверности и информативности данных необходимы валидированные источники. В настоящем исследовании использовались данные спектрорадиометра MODIS/Terra. Для восстановления, расчёта, моделирования спектральных зависимостей использовались данные и результаты программного комплекса MODTRAN. Вычислительные эксперименты проводились с использованием MODTRAN, данных наземных станций SURFRAD и прикладного математического пакета Scilab.

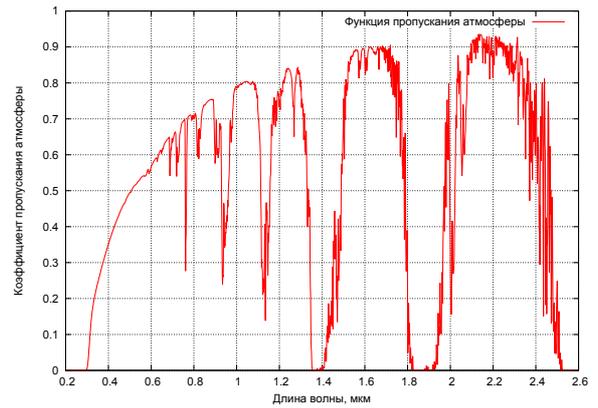
Следующим важным фактором, влияющим на точность, является способ восстановления поглощённой ПП энергии. В основе разрабатываемого метода лежит спектральный подход, в рамках которого восстановление поглощённой ПП энергии F_a осуществляется через соответствующие спектральные зависимости — полный поток падающего излучения $F_s(\lambda)$ и альбедо $a(\lambda)$ (коэффициент отражения ламбертовой поверхности) [103]:

$$F_a = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} F_s(\lambda)(1 - a(\lambda))d\lambda. \quad (1.13)$$

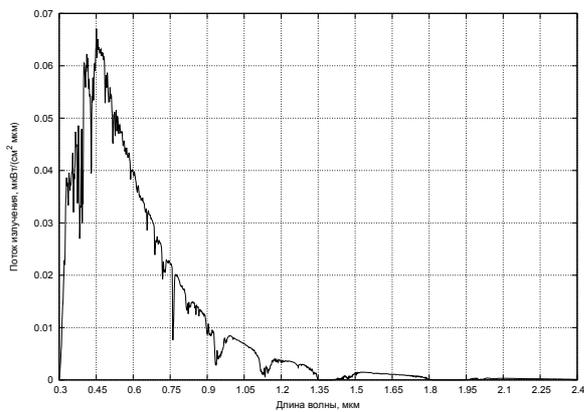
Исходными и промежуточными спектральными зависимостями при этом могут быть спектр потока солнечного излучения (спектральная солнечная постоянная), спектры падающих прямого и рассеянного излучений, спектр интенсивности на ВГА, спектральные функции коэффициентов пропускания атмосферы, спектральное альбедо ПП, примеры которых представлены на рис. 1.1. Семейства таких спектральных зависимостей при вариации параметров атмосферы и условий наблюдения, рассчитываются с исполь-



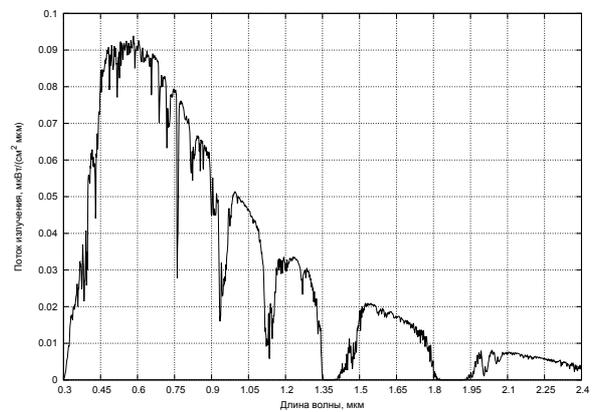
(а) Поток солнечного излучения на ВГА



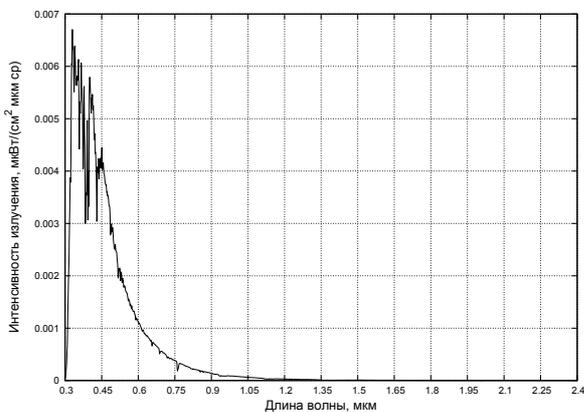
(b) Функция пропускания



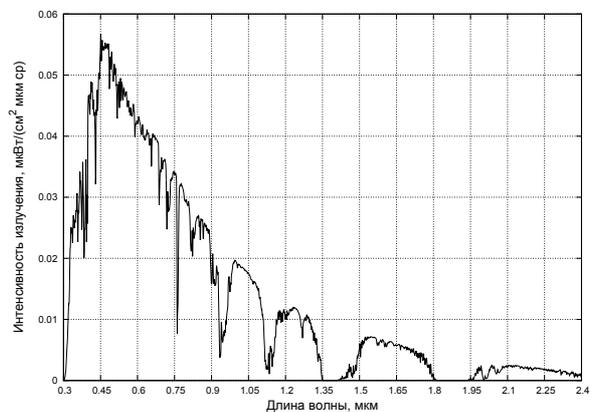
(с) Поток падающего на ПП рассеянного излучения



(d) Поток падающего на ПП прямого излучения



(e) Интенсивность излучения на ВГА при нулевом альбедо



(f) Интенсивность излучения на ВГА при единичном альбедо

Рис. 1.1. Примеры исследуемых спектральных зависимостей

зованием MODTRAN.

Точность восстановления поглощённой ПП энергии в соответствии с (1.13) зависит от точности восстановления $F_s(\lambda)$ и $a(\lambda)$. Проанализируем необхо-

димось восстановление спектрального альбедо. Продукты MODIS с данными по альбедо ПП имеют низкое временное разрешение (обновляются один раз в 8 дней), стандартные наборы альбедо из баз данных не всегда соответствуют его актуальным значениям для оперативного контроля поглощённой ПП энергии, что подтверждается вычислительным экспериментом [46, 47, 50, 51]. В этом эксперименте проводился сравнительный анализ моделируемых показаний спектрорадиометра MODIS с использованием MODTRAN по текущим параметрам состояния атмосферы с откликами в каналах MODIS. Для этого были обработаны данные MODIS (пространственное разрешение которых составляет 1 км в надире) на участках 10×10 км² (что соответствует 100 пикселям спутниковой сцены), взятых над пустыней и океаном. Данные о состоянии атмосферы (содержание водяного пара, АОТ, углы наблюдения и др.) усреднялись по обозначенной области, однако, необходимо отметить, что флуктуации этих параметров внутри области 10×10 км² были столь незначительными, что они не могли повлиять на результаты моделирования. Результаты эксперимента приведены в таблице 1.4. Здесь в графе MODIS представлены усреднённые значения интенсивности излучения, зарегистрированные спектрорадиометром на площади 10×10 км². В графе «Разброс в области» показаны средние отклонения каждого из значений интенсивности от среднего значения по всей области в процентах. В графе «MODTRAN» представлены восстановленные по текущим спутниковым данным о состоянии атмосферы значения интенсивности в каналах спектрорадиометра. В последней графе приведены величины отклонения усреднённого измеренного значения интенсивности по MODIS от восстановленного при помощи MODTRAN.

Результаты эксперимента показали, что даже для поверхностей с однородным и слабо изменчивым альбедо (пустыня, океан) отклонение в каналах составляют от 7% до 40%, а разброс в соседних пикселях выбранных областей — до 30%. Поскольку не включённые в эксперимент параметры

Таблица 1.4

Результаты сопоставления откликов в каналах спектрорадиометра MODIS и моделированных при помощи MODTRAN.

Номер канала	MODIS, Вт/(м ² мкм ср)	Разброс в области 10 × 10 км ² , %	MODTRAN, Вт/(м ² мкм ср)	Отклонение, %
Пустыня				
1	39.05	15.31	35.71	8.6
2	66.15	9.16	71.12	7.5
3	57.33	9.37	62.76	9.4
4	53.55	10.54	49.88	6.9
5	40.84	7.94	43.68	7.0
6	20.97	11.24	18.27	12.9
7	3.00	20.62	2.04	32
Океан				
1	10.63	3.97	11.95	12.4
2	3.28	8.72	3.64	11.0
3	52.53	1.05	57.99	10.4
4	21.96	2.11	23.73	8.0
5	0.88	22.74	0.84	4.5
6	0.35	18.96	0.29	17.1
7	0.08	28.21	0.11	37.5

атмосферы в MODTRAN учитываются по умолчанию (а их влияние менее 2%), можно считать, что полученный разброс обусловлен использованием неактуальных значений альbedo. Поэтому для обеспечения необходимой точности восстановления поглощённой ПП энергии в предлагаемом методе была разработана и провалидирована итерационная методика восстановления спектрального альbedo по откликам в каналах спектрорадиометра.

Гибридный метод предполагает два способа реализации и, следовательно, два способа восстановления падающего на ПП потока излучения $F_s(\lambda)$ — с использованием MODTRAN или опорных спектров. Погрешность восстановления падающего излучения с использованием MODTRAN не превышает 2%. Точность восстановления $F_s(\lambda)$ с использованием опорных спектров корректируется пошаговым контролем ошибок на каждом этапе вычислений в соответствии с методикой аппроксимации, который выполняется с помощью специально разработанных программных модулей.

Адаптация к входным данным. Гибридный метод контроля поглощённой ПП энергии может быть легко адаптирован к данным различных спутниковых платформ и каналов спектрорадиометров, поскольку функции чувствительности каналов в его алгоритме являются входными данными. Учёт же влияния параметров атмосферы и условий наблюдения в диапазонах их изменений на исследуемые спектры позволяет использовать метод для территорий с любыми географическими координатами и особенностями атмосферы.

Способы реализации. Реализация гибридного метода контроля поглощённой ПП энергии с использованием MODTRAN важна по нескольким причинам. MODTRAN является валидированным программным продуктом, что позволяет получить метод, обеспечивающий высокую точность контроля поглощённой энергии, что важно для ряда приложений, связанных с моделированием процессов на ПП [58–65]. Кроме того, результаты его верификации являются косвенными оценками точности итерационной методики восстановления спектрального альбеда. Однако, этот метод имеет низкое быстродействие и непригоден для оперативного мониторинга больших территорий. Гибридный метод, реализованный на основе опорных спектров, позволяет осуществлять оперативный контроль поглощённой энергии на обширных территориях. Он обладает высокими точностью, быстродействием, гибкостью по отношению к входным данным и не требует дорогостоящего инструментария.

Для восстановления поглощённой ПП энергии с применением спектрального подхода в соответствии с (1.13) можно выделить следующие этапы, которые реализуются как с использованием MODTRAN, так и программного модуля на основе опорных спектров:

- определение влияющих параметров на исследуемые спектры в пределах заданной погрешности;
- восстановление спектра излучения, падающего на ПП;

- восстановление спектрального альбеда ПП;
- восстановление поглощённой ПП энергии.

Применение спектрального подхода основано на предположении, что при распространении излучения в атмосфере нелинейными эффектами, в результате которых может изменяться длина волны излучения, можно пренебречь. Вследствие этого операции с выбранными спектральными зависимостями являются ассоциативными, что позволяет упростить процедуру восстановления поглощённой ПП энергии с использованием опорных спектров (глава 3).

Выводы

1. Проанализированы программно-техническое и методическое обеспечение дистанционного мониторинга поглощённой ПП энергии.
2. Обоснована необходимость использования спутниковых данных с высоким пространственным разрешением.
3. Описаны возможности программного комплекса MODTRAN5.2.1 как моделирующего инструмента.
4. Рассмотрены современные методы контроля поглощённой ПП энергии.
5. Предложен гибридный метод контроля поглощённой ПП энергии на основе спектрального подхода и проанализированы факторы, влияющие на его точность.
6. Выполнен вычислительный эксперимент по сравнительному анализу откликов в каналах MODIS и рассчитанных на MODTRAN, подтвердивший необходимость восстановления актуального альбеда ПП.

Основные результаты главы опубликованы в работах [40, 46, 47, 51]

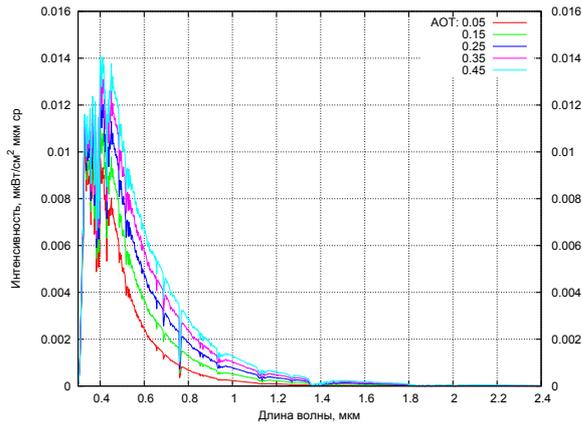
Глава 2

МЕТОД КОНТРОЛЯ ПОГЛОЩЁННОЙ ПП ЭНЕРГИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ MODTRAN

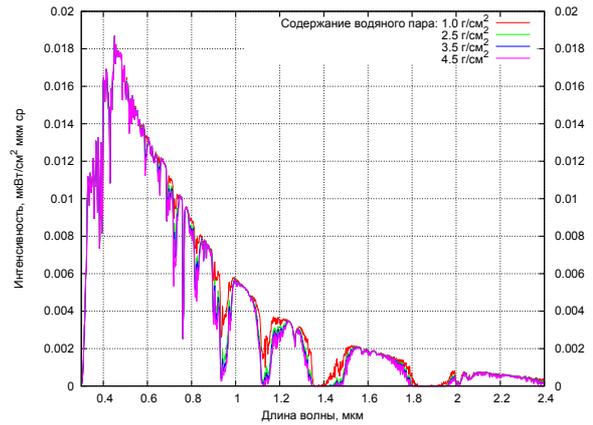
2.1. Оценка влияния параметров атмосферы, ПП и условий наблюдения на исследуемые спектры

Для восстановления поглощённой ПП энергии на основе спектрального подхода важным этапом является определение параметров, влияющих на исследуемые спектры излучения. Для этого была проведена серия вычислительных экспериментов с помощью MODTRAN5.2.1 [42]. Задавая ряд параметров в качестве исходных (тип атмосферы, альbedo ПП, высоту поверхности над уровнем моря, полное содержание водяного пара в атмосфере, аэрозольная оптическая толщина (АОТ), тип аэрозоля, концентрацию малых газовых составляющих, геометрию сцены наблюдения и др.) и варьируя один из них, оценивалось его влияние на спектр излучения на ВГА или на уровне ПП. Данные параметры варьировались в диапазонах их изменений. Например, АОТ изменялся от 0.05 до 3.5, полное содержание водяного пара — 0.5...4.5 г/см², солнечный зенитный угол — 0°...80° и т.д. Примеры полученных спектральных зависимостей приведены на рис. 2.1.

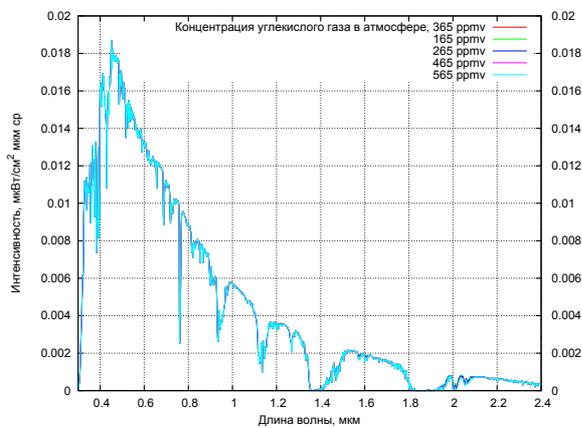
Результаты экспериментов показали, что к параметрам, существенно влияющим на форму спектра интенсивности излучения, когда зависимость интегрального значения энергии при вариации параметра была > 2%, можно отнести:



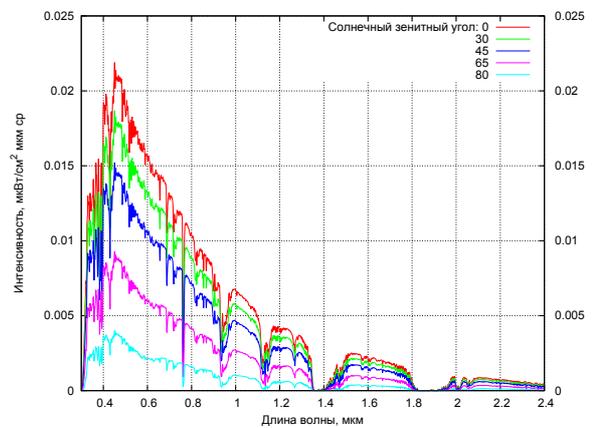
(a) АОТ



(b) Полное содержание водяного пара



(c) CO_2



(d) Солнечный зенитный угол

Рис. 2.1. Зависимость спектра интенсивности излучения на ВГА при вариации параметров атмосферы

- АОТ (τ);
- полное содержание водяного пара в столбе атмосферы (w);
- спектральное альбедро ПП ($a(\lambda)$);
- геометрия наблюдаемой сцены (зенитные углы Солнца θ и визирования β , относительный азимутальный угол ϕ);

Параметрами, оказывающими незначительное влияние на спектры излучения, являются:

- концентрации малых газовых составляющих при определённом типе атмосферы ($< 1.5\%$);

- высота поверхности над уровнем моря ($< 2\%$);
- температура приземного слоя поверхности ($< 1\%$).

На основании этих экспериментов установлено, что на спектры падающего прямого излучения наибольшее влияние оказывают τ, w, θ , падающего рассеянного излучения — $\tau, w, \theta, \beta, a(\lambda)$, на спектр интенсивности восходящего излучения на ВГА — $\tau, w, \theta, \beta, \phi, a(\lambda)$. Падающее рассеянное излучение, а также излучение на ВГА, в первом приближении линейно зависят от альбедо. Эти зависимости будут уточняться в конкретных решаемых задачах.

2.2. Входные и выходные файлы MODTRAN

MODTRAN5.2.1 управляется посредством основного файла, содержащего в себе так называемые карточки-строки (рис 2.2). Каждая строка со-

```

CM 2 3 2 -1 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0.000 -24
sTT 32 0 365.00 g 0.500 0. 0F 4 FTF
01_2009
5 0 0 1 0 0 -0.2000 0.000000 0.000000 0.000000 0.000
705.00 0.00 180.00
12 2 154 0
180.00 0.00
.300 2.400 .0010 0.002RM MTAА T
0

```

Рис. 2.2. Пример структуры входного файла MODTRAN

держит сгруппированные по тематике параметры: общие параметры запуска MODTRAN5.2.1, параметры состава атмосферы, параметры геометрии, спектральные параметры и т.д. Всего таких строк-карточек может быть до 39. В силу того, что программный код MODTRAN5.2.1 реализован на языке FORTRAN, входной файл должен быть составлен в строго форматном виде [82].

На выходе MODTRAN5.2.1 в виде текстовых или бинарных файлов выдаёт результаты расчётов: интенсивности восходящего излучения, потоки

падающего и восходящего излучения, функции пропускания атмосферы, параметры атмосферной коррекции и т.д. Пример выходного файла (расширение .fx), содержащего потоки излучения на разных высотах, приведён на рис. 2.3. Здесь первый столбец содержит длину волны, а затем

ALTITUDES:		0.00000 KM			100.00000 KM		
WAVLEN (MICRON)	UPWARD DIFFUSE	DOWNWARD DIFFUSE	DIRECT SOLAR	UPWARD DIFFUSE	DOWNWARD DIFFUSE	DIRECT SOLAR	
2.40000	3.31867E-05	8.70963E-04	3.96216E-03	9.15097E-05	0.00000E+00	5.76361E-03	
2.39900	3.38342E-05	8.86686E-04	4.04327E-03	9.38124E-05	0.00000E+00	5.77856E-03	
2.39800	3.17095E-05	8.31467E-04	3.78341E-03	8.65792E-05	0.00000E+00	5.79685E-03	
2.39700	2.92819E-05	7.72351E-04	3.48244E-03	7.79637E-05	0.00000E+00	5.80616E-03	
2.39600	3.12183E-05	8.24782E-04	3.71835E-03	8.40481E-05	0.00000E+00	5.80979E-03	
2.39500	3.35260E-05	8.85777E-04	4.00085E-03	9.17245E-05	0.00000E+00	5.81211E-03	
2.39400	3.40436E-05	9.01898E-04	4.06226E-03	9.36214E-05	0.00000E+00	5.81271E-03	
2.39300	3.29668E-05	8.74421E-04	3.93034E-03	9.05987E-05	0.00000E+00	5.81565E-03	
2.39200	3.04974E-05	8.05100E-04	3.63334E-03	8.19632E-05	0.00000E+00	5.82447E-03	
2.39100	3.05994E-05	8.05676E-04	3.64852E-03	8.07743E-05	0.00000E+00	5.83640E-03	
2.39000	3.26770E-05	8.62051E-04	3.90145E-03	8.82312E-05	0.00000E+00	5.84298E-03	
2.38900	3.23175E-05	8.49104E-04	3.86158E-03	8.84633E-05	0.00000E+00	5.83584E-03	
2.38800	3.07180E-05	8.05857E-04	3.66774E-03	8.23153E-05	0.00000E+00	5.81055E-03	
2.38700	2.98700E-05	7.87892E-04	3.56030E-03	7.87487E-05	0.00000E+00	5.77164E-03	
2.38600	2.97654E-05	7.85822E-04	3.54740E-03	7.94650E-05	0.00000E+00	5.73342E-03	
2.38500	2.94220E-05	7.76275E-04	3.50650E-03	7.86303E-05	0.00000E+00	5.71266E-03	
2.38400	2.74078E-05	7.31144E-04	3.25293E-03	7.16938E-05	0.00000E+00	5.73146E-03	
2.38300	2.89458E-05	7.83190E-04	3.42998E-03	7.87400E-05	0.00000E+00	5.80221E-03	
2.38200	3.35617E-05	9.01802E-04	3.99781E-03	9.52252E-05	0.00000E+00	5.89521E-03	
2.38100	3.44663E-05	9.17634E-04	4.11696E-03	9.58830E-05	0.00000E+00	5.96132E-03	
2.38000	3.36582E-05	8.99361E-04	4.01572E-03	9.21253E-05	0.00000E+00	5.98639E-03	
.....	

Рис. 2.3. Пример выходного файла MODTRAN со спектрами потоков излучения на различных высотах

идут группы столбцов со спектральными потоками излучения: восходящим рассеянным, падающими прямым и рассеянным для определённого уровня высоты в атмосфере. Таких уровней можно задать от 2 до 20 в диапазоне высот от 0 до 100 км. Эти данные используются для восстановления полного падающего на ПП потока излучения.

На рис. 2.4 приведён пример выходного файла с расчётом интенсивности восходящего излучения на ВГА (расширение .tp7 и .7sc). Столбцы

WAVLEN(MCRN)	TRAN	PTH_THRML	THRML_SCT	SURF_EMIS	SOL_SCAT	SING_SCAT	GRND_RFLT	DRCT_RFLT	TOTAL_RAD	REF_SOL	SOL@0BS	DEPTH	DIR_EM	TOA_SUN	BBODY_T(K)
0.300000	0.0104562	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	7.0966E-05	6.4923E-05	8.4914E-07	3.4309E-07	7.1815E-05	3.90E-06	4.47E-02	4.633	0.7000	4.4713E-02	1922.404
0.301000	0.0158651	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	8.9289E-05	7.7377E-05	1.9077E-06	7.7388E-07	9.1197E-05	8.79E-06	4.38E-02	4.197	0.7000	4.3824E-02	1935.852
0.302000	0.0229740	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	1.3189E-04	1.0583E-04	4.6810E-06	1.9088E-06	1.3657E-04	2.17E-05	4.70E-02	3.817	0.7000	4.6975E-02	1962.865
0.303000	0.0316990	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	2.0582E-04	1.5422E-04	9.9521E-06	4.0773E-06	2.1578E-04	4.63E-05	5.46E-02	3.483	0.7000	5.4564E-02	1995.355
0.304000	0.0420171	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	3.0054E-04	2.1050E-04	1.8558E-05	7.6447E-06	3.1910E-04	8.68E-05	5.96E-02	3.195	0.7000	5.9604E-02	2023.466
0.305000	0.0540884	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	4.0311E-04	2.6505E-04	3.0094E-05	1.2463E-05	4.3320E-04	1.42E-04	5.96E-02	2.937	0.7000	5.9502E-02	2045.000
0.306000	0.0673135	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	5.2381E-04	3.2499E-04	4.5757E-05	1.9069E-05	5.6957E-04	2.17E-04	5.80E-02	2.713	0.7000	5.8003E-02	2064.275
0.307000	0.0820244	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	7.1687E-04	4.2115E-04	7.1464E-05	2.9925E-05	7.8833E-04	3.40E-04	5.95E-02	2.514	0.7000	5.9513E-02	2088.860
0.308000	0.0972339	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	9.2280E-04	5.2018E-04	1.0079E-04	4.2309E-05	1.0236E-03	4.81E-04	6.10E-02	2.339	0.7000	6.1013E-02	2108.147
0.309000	0.1130065	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	1.0642E-03	5.7706E-04	1.2612E-04	5.3031E-05	1.1904E-03	6.02E-04	5.70E-02	2.188	0.7000	5.6982E-02	2117.299
0.310000	0.1297329	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	1.3956E-03	7.2545E-04	1.8013E-04	7.5890E-05	1.5757E-03	8.62E-04	5.87E-02	2.048	0.7000	5.8726E-02	2139.327
0.311000	0.1456475	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	1.9115E-03	9.6604E-04	2.6121E-04	1.1027E-04	2.1727E-03	1.25E-03	6.81E-02	1.930	0.7000	6.8081E-02	2166.137
0.312000	0.1621262	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	2.2904E-03	1.1285E-03	3.2961E-04	1.3942E-04	2.6200E-03	1.58E-03	7.02E-02	1.824	0.7000	7.0247E-02	2179.941
0.313000	0.1783582	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	2.6127E-03	1.2563E-03	3.9536E-04	1.6766E-04	3.0800E-03	1.90E-03	6.90E-02	1.727	0.7000	6.9025E-02	2188.926
0.314000	0.1937324	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	2.9766E-03	1.4024E-03	4.7084E-04	2.0025E-04	3.4475E-03	2.27E-03	6.97E-02	1.644	0.7000	6.9666E-02	2197.897
0.315000	0.2090733	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	3.1687E-03	1.4658E-03	5.2169E-04	2.2250E-04	3.6904E-03	2.53E-03	6.64E-02	1.567	0.7000	6.6358E-02	2199.784
0.316000	0.2230849	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	3.4003E-03	1.5462E-03	5.8280E-04	2.4944E-04	3.9831E-03	2.83E-03	6.43E-02	1.502	0.7000	6.4332E-02	2202.601
0.317000	0.2362123	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	3.9274E-03	1.7612E-03	6.9690E-04	2.9933E-04	4.6243E-03	3.40E-03	6.87E-02	1.444	0.7000	6.8651E-02	2213.330
0.318000	0.2502513	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	4.3676E-03	1.9330E-03	8.0010E-04	3.4472E-04	5.1677E-03	3.92E-03	7.07E-02	1.387	0.7000	7.0657E-02	2220.104
0.319000	0.2632442	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	4.7500E-03	2.0743E-03	8.9991E-04	3.8915E-04	5.6499E-03	4.42E-03	7.11E-02	1.336	0.7000	7.1093E-02	2224.599
0.320000	0.2747550	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	5.2340E-03	2.2617E-03	1.0213E-03	4.4335E-04	6.2553E-03	5.04E-03	7.41E-02	1.293	0.7000	7.4088E-02	2230.569
0.321000	0.2869132	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	5.5390E-03	2.3701E-03	1.1107E-03	4.8387E-04	6.6497E-03	5.50E-03	7.44E-02	1.250	0.7000	7.4368E-02	2232.118
0.322000	0.2953784	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	5.4082E-03	2.2979E-03	1.1118E-03	4.8633E-04	6.5200E-03	5.52E-03	7.03E-02	1.220	0.7000	7.0322E-02	2224.728
0.323000	0.3052013	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	5.3946E-03	2.2760E-03	1.1424E-03	5.0260E-04	6.5371E-03	5.71E-03	6.73E-02	1.188	0.7000	6.7346E-02	2219.843
0.324000	0.3164081	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	6.0378E-03	2.5349E-03	1.3157E-03	5.8265E-04	7.3534E-03	6.62E-03	7.24E-02	1.151	0.7000	7.2383E-02	2227.774
0.325000	0.3226185	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	7.0238E-03	2.9472E-03	1.5684E-03	6.9970E-04	8.5922E-03	7.95E-03	8.35E-02	1.132	0.7000	8.3486E-02	2240.149
0.326000	0.3316988	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	8.1175E-03	3.3983E-03	1.8601E-03	8.3566E-04	9.9776E-03	9.49E-03	9.39E-02	1.104	0.7000	9.3944E-02	2252.066
0.327000	0.3401023	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	8.5802E-03	3.5871E-03	2.0190E-03	9.0915E-04	1.0591E-02	1.03E-02	9.76E-02	1.079	0.7000	9.7602E-02	2253.803
0.328000	0.3449903	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	8.5604E-03	3.5803E-03	2.0538E-03	9.3548E-04	1.0614E-02	1.06E-02	9.73E-02	1.065	0.7000	9.7338E-02	2248.942
0.329000	0.3539515	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	9.1844E-03	3.8343E-03	2.2619E-03	1.0377E-03	1.1446E-02	1.18E-02	1.02E-01	1.039	0.7000	1.0207E-01	2252.582
0.330000	0.3609920	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	9.5175E-03	3.9712E-03	2.3936E-03	1.1049E-03	1.1911E-02	1.26E-02	1.05E-01	1.019	0.7000	1.0478E-01	2252.135

Рис. 2.4. Пример выходного файла MODTRAN со спектрами интенсивности излучения на ВГА

с данными обозначают следующие спектральные величины: длину волны, функцию пропускания атмосферы, интенсивность прямого излучения (теплого), интенсивность рассеянного излучения (теплого), интенсивность излучения, испущенного поверхностью, интенсивность рассеянного атмосферой излучения, интенсивность однократно рассеянного излучения, интенсивность отражённого от ПП излучения, интенсивность отражённого от ПП излучения без учёта многократного переотражения, полную интенсивность на ВГА, поток излучения на ВГА, ослабленный атмосферой, солнечный поток, падающий на ВГА, величину отрицательного натурального логарифма функции пропускания, излучательную способность ПП, солнечную постоянную, температуру, которой должно обладать абсолютно чёрное тело, чтобы испускать излучение с интенсивностью, равной величине полной интенсивности излучения на ВГА.

Методика восстановления альбедо ПП использует возможность MODTRAN5.2.1 моделировать показания спутниковых приборов. При этой опции MODTRAN5.2.1 использует спектральную функцию чувствительности прибора (например, спектрорадиометра MODIS), предустановленную или заданную пользователем, для «сканирования» спектра излучения на ВГА.

Тем самым рассчитывается отклик в каналах прибора. Результаты этого расчёта записываются в отдельный выходной файл, структура которого схожа с остальными выходными файлами MODTRAN5.2.1 — столбцы с номерами каналов радиометра и соответствующие расчётные показания: интенсивность излучения, функция пропускания на данном диапазоне длин волн, доли теплового и солнечного излучения, доли рассеянного и прямого излучения и т.д.

При моделировании функции пропускания атмосферы в соответствующем режиме работы, MODTRAN5.2.1 позволяет рассчитывать полную функцию пропускания атмосферы и её компоненты: функции пропускания водяного пара, аэрозоля, газовых составляющих и т.д. В данном случае результаты расчёта записываются в файлы с расширением .7sc и .tp7 вместо интенсивностей излучения. Эта возможность MODTRAN5.2.1 далее будет использоваться в разделе 3.2 при расчёте прямого падающего излучения.

2.3. Итерационная методика восстановления спектрального альбедо и её сравнительная валидация

Для реализации предложенной методики необходимы два условия: спутниковый прибор с определённым набором спектральных каналов, позволяющий измерять интенсивность излучения на ВГА и определять параметры атмосферы, и наличие способа моделировать интенсивности излучения на ВГА по заданным параметрам атмосферы. Алгоритм восстановления спектрального альбедо по данным каналов спутникового прибора приведён на рис. 2.5. Суть методики заключается в следующем [46, 47, 50]. По начальному спектральному альбедо, выбранному в соответствии с типом ПП рассматриваемой сцены, восстанавливается спектр интенсивности излучения $L(\lambda)$ на ВГА с учётом зависимости $L(a)$ при заданных параметрах атмосферы и условиях наблюдения и рассчитываются интенсивности в каналах спектро радиометра по их функциям чувствительности. Устанавливаются

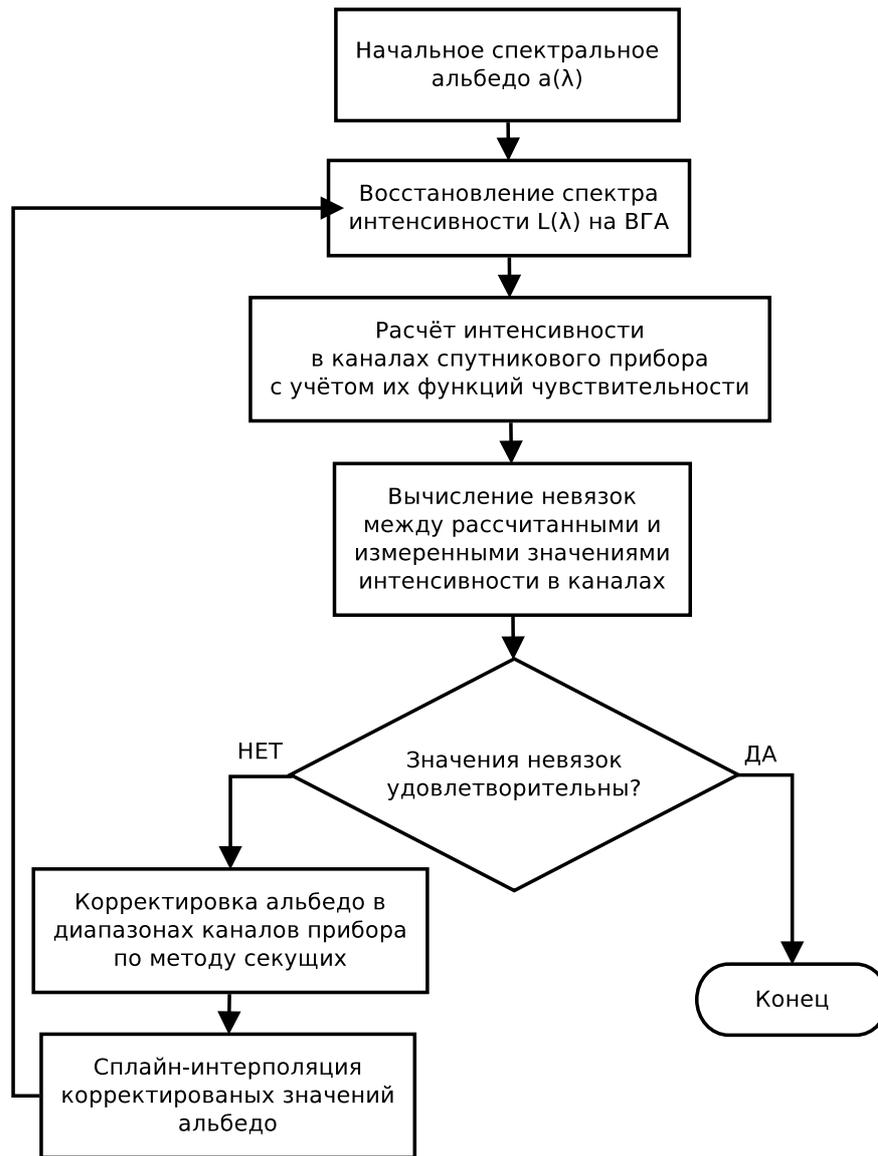


Рис. 2.5. Алгоритм восстановления спектрального альbedo по данным каналов спутникового прибора

значения невязок между рассчитанными и измеренными интенсивностями в каналах, которые минимизируются корректировкой альbedo. Вследствие практически линейной зависимости интенсивности излучения на ВГА от альbedo ПП для корректировки значений альbedo используется метод секущих. На первой итерации в качестве второй точки выбирается значение альbedo $a_2 = a_1(1 + 1.5\eta)$, η — относительная невязка, a_1 — начальное значение альbedo в каналах. Если значение альbedo в канале после первой итерации выходит за диапазон возможных значений альbedo $[0, 1]$, 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 величины. Значения альbedo в каналах (и соответствующее интерполированное спектральное альbedo), минимизирующие невязки, являются актуальными значениями для рассматриваемой сцены.

Реализация этой методики в MODTRAN5.2.1 основана на его возможности моделировать показания каналов спектро радиометра [41,46,47]. По данным, полученным со спектро радиометра MODIS о состоянии атмосферы и условий наблюдения, влияющих на интенсивность излучения на ВГА — τ , w , θ , β , ϕ , $a(\lambda)$, а также функций чувствительности спектральных каналов рассчитывались значения интенсивности излучения в каналах. Варьируя значения спектрального альbedo ПП во входных данных MODTRAN5.2.1, получали расчётные значения интенсивности в каналах спектро радиометра и сравнивали с измеренными 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 1-7 каналов спектро радиометра MODIS/Terra, покрывающие диапазон длин волн 0.459–2.155 мкм. Обработка каждой точки спутниковой сцены занимала 6-9 минут при использовании персонального компьютера.

Точность восстановления альbedo предложенным методом оценивалась путём сопоставления восстановленных значений со значениями альbedo из продукта MODIS MOD43B3, обновляемыми раз в 16 дней. Для проведения такого эксперимента были взяты 16-дневные спутниковые данные с аль-

бедо, а также ежедневные данные показаний каналов спектрорадиометра, параметров атмосферы и условий наблюдения за период июнь-август 2015 года над территорией юга Западной Сибири. На рис. 2.6 приведён пример тайла MODIS с альбедо ПП (канал №2).



Рис. 2.6. Пример использованной сцены MODIS с альбедо ПП (канал 2)

В некоторой выбранной точке с определёнными географическими координатами с использованием MODTRAN5.2.1 восстанавливалось суточное

значение альbedo, которое затем сравнивалось с референсным 16-дневным значением в этой точке. Из-за суточной вариации орбиты спутника для наиболее адекватного сопоставления было выбрано 6 дней из 16-дневного цикла, когда заданная точка находилась не на краю спутниковой сцены. Результат этого эксперимента приведён в таблице 2.1. Показано, что от-

Таблица 2.1

Сопоставление восстановленного альbedo с референсным.

№ канала	Референс. альbedo	Восстановленное альbedo по дням 1-6						Среднее знач-е	Отклонение
1	0.054	0.045	0.051	0.056	0.048	0.056	0.052	0.05133	5%
2	0.17	0.2	0.16	0.17	0.16	0.19	0.16	0.1733	2%
3	0.03	0.034	0.032	0.029	0.034	0.036	0.031	0.03267	9%
4	0.05	0.046	0.047	0.049	0.047	0.051	0.047	0.04783	4%
5	0.2	0.19	0.19	0.19	0.18	0.19	0.2	0.19	5%
6	0.2	0.21	0.17	0.18	0.2	0.18	0.19	0.1883	6%
7	0.1	0.08	0.09	0.1	0.1	0.09	0.11	0.095	5%

клонение среднего за 6 дней значения альbedo не превышает 9% от референсного.

Для оценки вариативности альbedo во времени в таблице 2.2 приведены

Таблица 2.2

Вариация альbedo ПП за летний период.

№ канала	Значения альbedo по датам					ср. кв. отклонение
	2.06	18.06	4.07	20.07	5.08	
1	0.057	0.046	0.045	0.045	0.058	13.3%
2	0.198	0.233	0.240	0.242	0.265	10.2%
3	0.039	0.035	0.035	0.031	0.044	13.4%
4	0.062	0.06	0.062	0.059	0.075	10.2%
5	0.248	0.269	0.267	0.270	0.286	5%
6	0.205	0.192	0.191	0.192	0.189	3.3%
7	0.105	0.087	0.085	0.085	0.085	9.8%

значения альbedo из продукта MOD43B3 для некоторой точки выбранной

территории за летний период. Видно, что альbedo ПП в течение летнего периода не остаётся постоянным, а его среднеквадратичное отклонение может достигать 13.4% в зависимости от спектрального канала.

По приведённым выше данным можно сделать вывод, что восстанавливаемое альbedo ПП по предложенной методике соответствует его реальным значениям в пределах средней изменчивости и может быть использовано для расчёта поглощённой ПП энергии.

На рис. 2.7 представлен пример спектрального альbedo, восстановленного по предложенной методике для ПП растительного типа, а также спектральные альbedo для этого типа поверхности из базы данных ASTER [104]. Видно, что восстановленное спектральное альbedo хорошо соотносится с

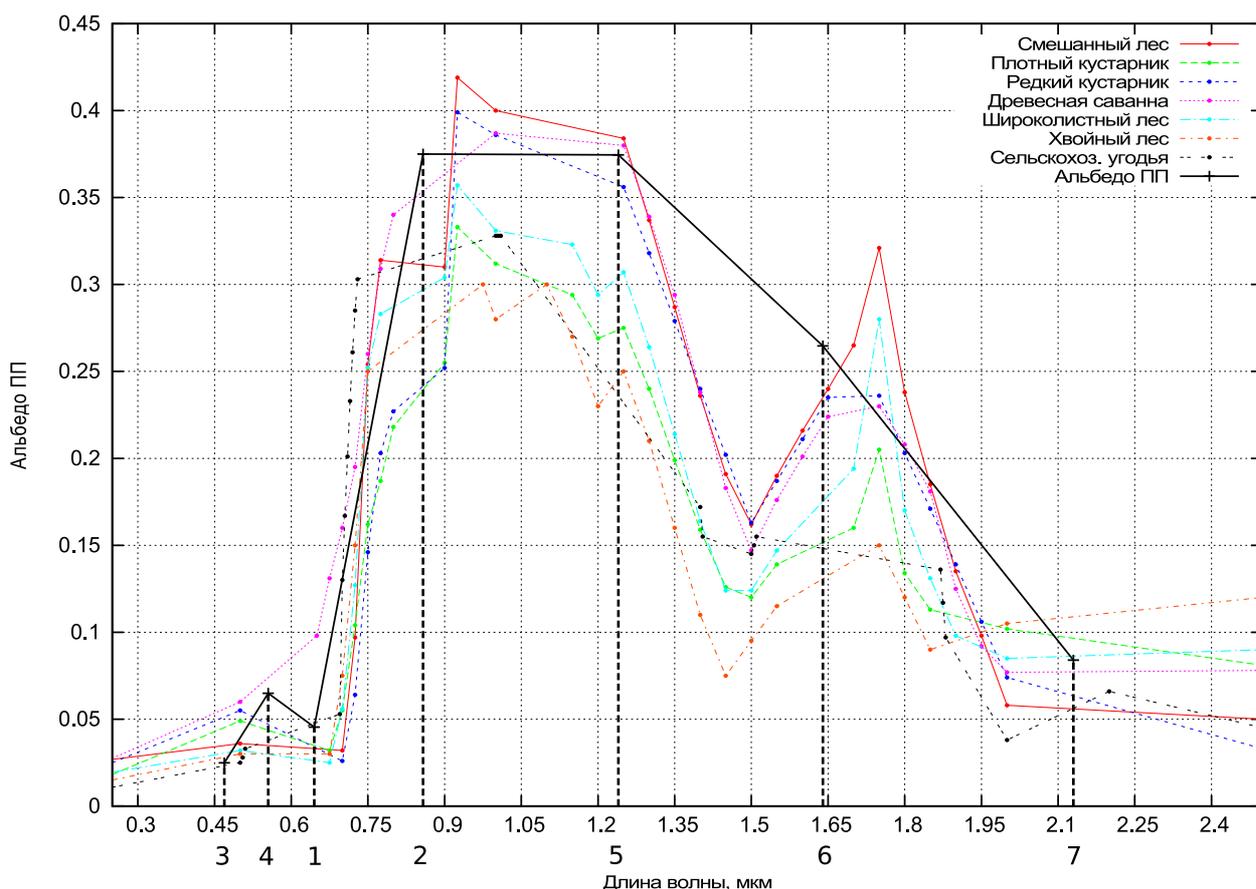


Рис. 2.7. Спектральные альbedo растительной поверхности, взятые из БД ASTER, интерполированное альbedo ПП, вычисленное по итерационной методике, и каналы 1-7 спектрометра MODIS (пунктирные линии)

альбедо из базы данных за исключением областей 1.3-1.5 мкм и 1.8-1.95 мкм. Принимая во внимание наличие зон поглощения именно в этих областях, где альбедо не может оказать влияние на величину поглощённой энергии, можно сделать вывод, что предложенная простая методика позволяет довольно точно восстанавливать спектральное альбедо. В данном эксперименте использовались 7 каналов спектрорадиометра MODIS. В дальнейшем прикладном применении предлагаемой методики восстановления спектрального альбедо использовались 17 коротковолновых каналов спектрорадиометра MODIS из 20 (каналы №№ 18, 19, 26 были исключены ввиду того, что их диапазоны находятся в области поглощения водяным паром).

2.4. Расчёт спектра падающего на ПП излучения

Для расчёта падающего на ПП полного потока излучения с использованием MODTRAN5.2.1 необходимые параметры (солнечный зенитный угол, полное содержание водяного пара в столбе атмосферы, АОТ) были получены из продуктов MODIS. Другим параметрам в MODTRAN было присвоено значение по умолчанию в виду того, что их вариации не оказывают значительного влияния на величину падающей энергии.

При вычислении полного потока падающего на ПП излучения MODTRAN5.2.1 использует модель плоско-параллельной многослойной атмосферы [88]. Сначала вычисляются потоки для каждого слоя в отдельности, которые затем складываются. Для этого решается уравнение переноса монохроматического излучения:

$$\mu \frac{du_\nu(\tau_\nu, \mu, \phi)}{d\tau} = u_\nu(\tau_\nu, \mu, \phi) - S_\nu(\tau_\nu, \mu, \phi) \quad (2.1)$$

Здесь $u_\nu(\tau_\nu, \mu, \phi)$ — интенсивность излучения вдоль направления μ, ϕ при оптической толщине τ_ν перпендикулярно слою среды (ϕ — азимутальный угол, μ — косинус СЗУ). $S_\nu(\tau_\nu, \mu, \phi)$ — функция источника (сохранены оригинальные обозначения величин).

MODTRAN5.2.1 позволяет решать уравнение переноса (2.1), используя численные методы дискретных ординат [83] или двухпоточное приближение [82].

2.5. Алгоритм восстановления поглощённой ПП энергии и его реализация

Алгоритм восстановления поглощённой ПП энергии с использованием MODTRAN представлен на рис. 2.8 и содержит следующие этапы.

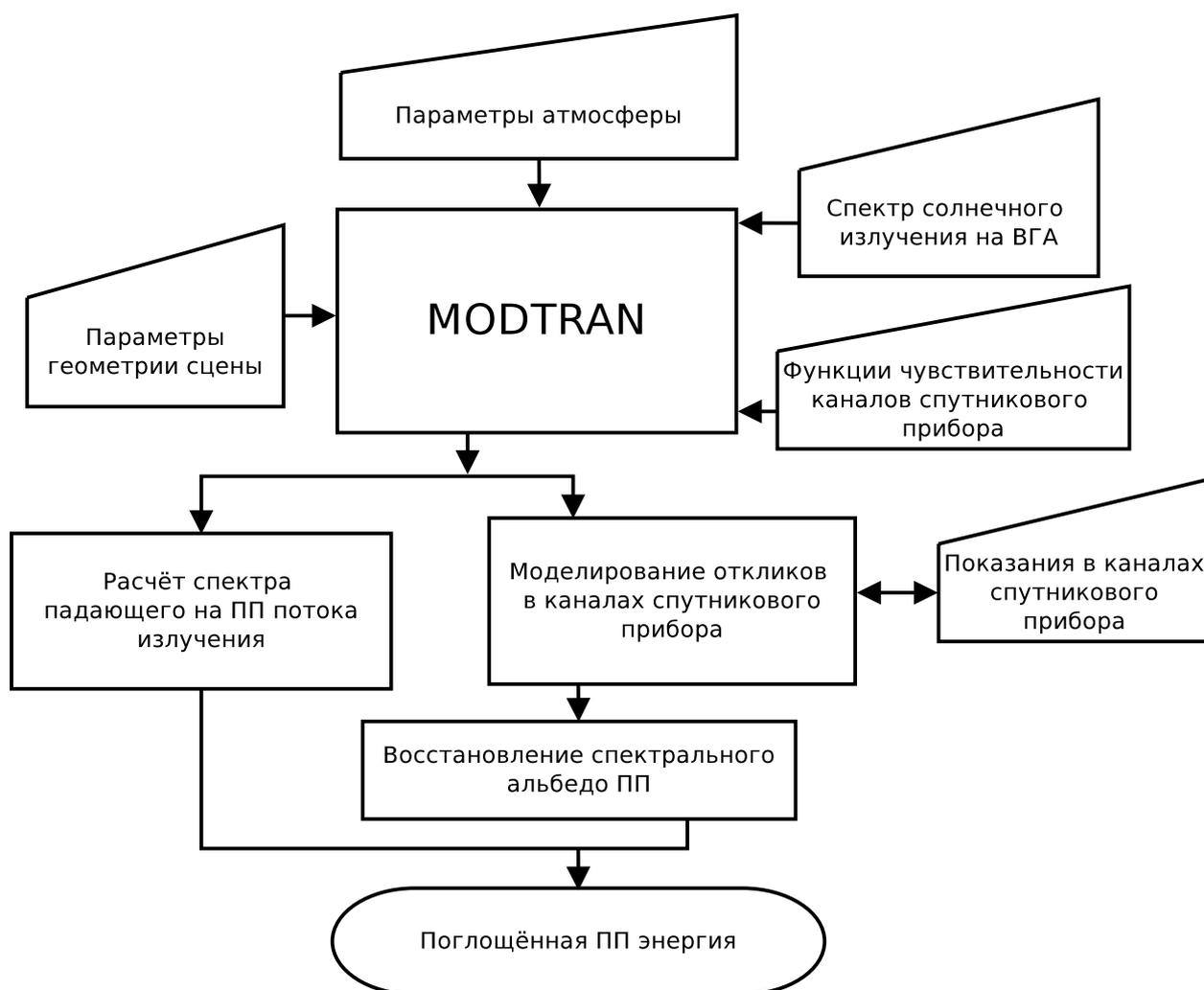


Рис. 2.8. Схема алгоритма восстановления поглощённой ПП энергии с использованием MODTRAN

- В качестве входных данных MODTRAN5.2.1 задаются параметры ат-

мосферы и геометрии сцены (полное содержание водяного пара в атмосфере, АОТ, солнечный зенитный угол), полученные из продуктов MODIS, спектральная солнечная постоянная [105], функции чувствительности каналов спутникового прибора.

- Рассчитывается спектр падающего на ПП потока излучения.
- В соответствии с предложенной итерационной методикой восстанавливается спектральное альbedo ПП.
- По восстановленным спектрам альbedo и падающего потока излучения рассчитывается поглощённая энергия в соответствии с (1.13).

Для реализации этого алгоритма был разработан программный модуль, включающий в себя утилиту распаковки спутниковых данных формата .hdf и извлечению необходимых массивов данных с определённых территорий, а также интерфейс взаимодействия с программным комплексом MOD-TRAN5.2.1 для расчёта спектра падающего на ПП потока излучения, восстановления актуального спектрального альbedo и поглощённой энергии.

2.6. Верификация разработанного метода

Решая задачу восстановления поглощённой ПП энергии, будем считать, что параметры атмосферы, полученные из данных дистанционного зондирования или станций наземного наблюдения, известны точно. Однако, «следует всегда помнить, что такое предположение несправедливо для реальной атмосферы; недостаточная точность параметров может сказаться на точности полученных значений радиационного поля в не меньшей степени, чем точность использованного численного приближения» [106].

Одним из способов верифицировать результаты, полученные при помощи предложенного метода является сравнение их с аналогичными данными, полученными из достоверного источника. Одним из таких источников является сеть станций наземного мониторинга радиационного баланса SURFRAD в США. Эта сеть была развёрнута в 1995 г. для получения дан-

ных о радиационном балансе и его составляющих, исследования свойств атмосферы и наземной валидации спутниковых данных [107]. В инструментарий станций входят такие приборы как пиргелиометры, фотометры, пиранометры и радиометры, позволяющие вести мониторинг и регистрацию падающего прямого, рассеянного и полного, а также отражённого от поверхности излучения [108]. В табл. 2.3 приведены географические характеристики станций сети SURFRAD.

Таблица 2.3

Характеристики станций сети наземного наблюдения SURFRAD

Название станции	Широта	Долгота	Высота н.у.м., м	Часовой пояс
Bondville, Иллинойс	40.05° с.ш.	88.37° в.д.	230	UTC-6
Boulder, Колорадо	40.12° с.ш.	105.24° в.д.	1689	UTC-6
Desert Rock, Невада	36.62° с.ш.	116.02° в.д.	1007	UTC-8
Fort Peck, Монтана	48.31° с.ш.	105.1° в.д.	634	UTC-7
Goodwin Creek, Миссисипи	34.25° с.ш.	89.87° в.д.	98	UTC-6
Penn. State Univ., Пенсильвания	40.72° с.ш.	77.93° в.д.	376	UTC-5
Sioux Falls, Южная Дакота	43.73° с.ш.	96.62° в.д.	473	UTC-6
Southern Great Plains, Оклахома	36.6° с.ш.	97.49° в.д.	314	UTC-6

Для верификации было выбрано три станции: Boulder, Bondville и Desert Rock, с которых были получены данные за 2010-2013 гг. наблюдения. Затем для координат этих станций с сервера NASA был загружен ряд спутниковых сцен, содержащих следующие необходимые продукты MODIS: MOD03 (с данными геолокации), MOD05 (с данными о содержании водяного пара в атмосфере), MOD04_3KM и MOD04_L2 (AOT), MOD35_L2 (с маской облачности) и MOD021KM (со значениями интенсивности излучения, зарегистрированными каналами прибора).

Основной проблемой при проведении верификации по наземным станциям является необходимость пространственной и временной синхронизации данных спутникового наблюдения с результатами точечных наземных измерений. Стандартная спутниковая сцена MODIS (пять минут пролёта спутника) покрывает площадь $2030 \times 1354 \text{ км}^2$, а данные SURFRAD регистрируются с временным разрешением в одну минуту.

Для пространственной синхронизации данных из спутниковой сцены выбирался пиксель, координаты которого наиболее близки к координатам наземной станции. Таким образом, точность пространственной синхронизации ограничена пространственным разрешением используемых спутниковых данных (в случае MODIS 1 км). Вследствие большой ширины полосы скана MODIS форма пикселей, отстоящих от надира более чем на 30° , искажается, и они не могут рассматриваться как квадратные. Поэтому для процедуры верификации были отобраны такие сцены, на которых наземная станция находилась ближе к центру спутниковой сцены.

Для временной синхронизации с точностью до минуты вычислялось время сканирования выбранного пикселя: спутниковая сцена делилась на пять участков вдоль направления полёта спутника, а затем по положению найденного пикселя ему присваивалось время от +0 до +4 минут от начала сканирования текущей сцены. После этого выполнялась дополнительная проверка на совпадение солнечного зенитного угла (который регистрируется как на спутниковом приборе, так и на наземной станции).

Всего для верификации было отобрано по 25 спутниковых сцен для каждой выбранной станции. Результаты приведены в таблице 2.4. Таблица разделена на три части, каждая из которых соответствует определённой станции. В первом столбце приводятся значения поглощённой энергии, рассчитанное с использованием MODTRAN5.2.1 по предложенной методике, во втором — значение, измеренное на станции наземного наблюдения. В третьем столбце приводится разница (невязка) измеренного и рассчитан-

Таблица 2.4

Результаты верификации

Bondville				Boulder				Desert Rock			
Расчёт	Станция	Разн.	%	Расчёт	Станция	Разн.	%	Расчёт	Станция	Разн.	%
749.4	779.8	-30.4	-3.90	688.8	686.9	1.9	0.27	700.8	719.0	-18.2	-2.54
849.5	851.6	-2.1	-0.24	736.0	741.5	-5.5	-0.74	814.6	831.8	-17.2	-2.07
713.2	762.7	-49.6	-6.50	783.5	778.8	4.7	0.60	826.0	828.6	-2.6	-0.32
751.7	760.7	-9.0	-1.19	556.7	549.5	7.2	1.31	771.8	750.5	21.3	2.83
740.3	793.8	-53.5	-6.74	755.4	819.9	-64.6	-7.87	726.9	757.5	-30.6	-4.05
822.5	787.9	34.6	4.39	814.0	870.3	-56.3	-6.47	759.5	770.9	-11.4	-1.48
707.8	721.4	-13.7	-1.89	822.1	836.7	-14.6	-1.75	737.5	800.3	-62.8	-7.85
805.2	793.4	11.8	1.48	741.6	777.0	-35.5	-4.56	746.3	778.8	-32.5	-4.18
772.5	749.1	23.4	3.13	800.7	824.0	-23.4	-2.83	712.5	741.1	-28.6	-3.86
811.6	811.3	0.3	0.04	752.2	832.4	-80.2	-9.63	653.5	725.4	-71.9	-9.91
762.5	830.4	-67.9	-8.18	758.3	753.5	4.8	0.63	673.2	739.9	-66.7	-9.01
657.8	713.9	-56.1	-7.86	821.2	841.3	-20.1	-2.39	566.5	512.2	54.3	10.60
783.1	716.3	66.8	9.33	787.0	829.4	-42.4	-5.11	551.4	598.3	-46.9	-7.84
796.1	825.2	-29.2	-3.53	478.8	477.7	1.1	0.23	535.2	577.6	-42.4	-7.34
775.4	767.9	7.5	0.97	701.2	770.5	-69.3	-8.99	521.1	555.2	-34.1	-6.14
752.3	794.1	-41.8	-5.26	784.5	835.6	-51.1	-6.11	680.1	755.8	-75.8	-10.02
793.5	838.7	-45.2	-5.39	792.6	822.3	-29.8	-3.62	646.2	609.1	37.1	6.08
696.2	734.9	-38.7	-5.26	698.7	761.6	-63.0	-8.27	720.8	756.4	-35.6	-4.70
713.0	740.0	-27.0	-3.65	758.2	796.5	-38.3	-4.81	671.9	614.0	57.9	9.43
774.6	791.4	-16.8	-2.12	776.5	808.7	-32.2	-3.98	711.1	713.4	-2.3	-0.32
693.5	745.1	-51.6	-6.92	803.5	857.1	-53.6	-6.26	824.9	837.7	-12.8	-1.52
721.4	696.9	24.5	3.52	750.2	773.5	-23.3	-3.01	699.1	666.7	32.4	4.86
670.7	683.9	-13.2	-1.93	746.8	762.3	-15.5	-2.04	801.1	881.1	-80.0	-9.08
618.5	633.4	-14.9	-2.36	729.3	750.7	-21.5	-2.86	830.4	868.8	-38.4	-4.42
639.5	650.7	-11.2	-1.72	685.7	713.6	-27.9	-3.91	722.2	707.2	15.0	2.12
Среднее:		29.6	3.90	Среднее:		31.5	3.93	Среднее:		37.2	5.30
СКО: 36.29				СКО: 39.67				СКО: 44.13			

ного значений, а в четвёртом — относительная погрешность рассчитанной энергии. Размерность величины поглощённой энергии — Вт/м².

В двух последних строках таблицы приведены абсолютные средние значения невязки и относительной погрешности, а также среднеквадратичное отклонение. Среднее значение модуля относительной погрешности составляет 4.38% при величине модуля невязки 32.76 Вт/м². Среднеквадратичное отклонение при этом не превышает 44.13 Вт/м², что лучше результатов, полученных в работах [26–28]. В приложении приведены дата и время каждой выбранной сцены.

Необходимо отметить, что в условиях облачной атмосферы MODIS не позволяет получить объективные данные по АОТ и полному содержанию

водяного пара в столбе атмосферы. По этой причине облачные сцены отсеивались из набора данных для верификации. Также из анализа были убраны те сцены, в которых присутствовал сильный разброс поглощённой энергии во времени по данным SURFRAD, что указывало на наличие облачности.

Выводы

1. Разработан метод контроля поглощённой ПП энергии с использованием MODTRAN5.2.1, основанный на спектральном подходе и восстановлении спектрального альбеда ПП по откликам каналов спектрорадиометра.
2. Проведён вычислительный эксперимент по оценке влияния параметров атмосферы, ПП и условий наблюдения на исследуемые спектры.
3. Предложена итерационная методика восстановления спектрального альбеда ПП по откликам каналов спутникового прибора (использовалось 17 каналов спектрорадиометра MODIS), и представлены результаты её сравнительной валидации.
4. Разработан алгоритм восстановления поглощённой ПП энергии с использованием MODTRAN5.2.1 и реализующий его программный модуль.
5. Представлена методика верификации предложенного метода по данным наземных станций SURFRAD и её результаты.

Основные результаты главы опубликованы в работах [42, 46, 47, 51].

Глава 3

ОПЕРАТИВНЫЙ КОНТРОЛЬ ПОГЛОЩЁННОЙ ПП ЭНЕРГИИ НА ОСНОВЕ ОПОРНЫХ СПЕКТРОВ

3.1. Метод опорных спектров

3.1.1. Опорные спектры

Для решения задачи оперативного контроля поглощённой ПП энергии на обширных территориях по спутниковым данным необходимо восстанавливать следующие спектры: потоки падающего прямого и рассеянного излучения, интенсивности на ВГА при нулевом и единичном альбедо ПП (последние необходимы для восстановления спектрального альбедо ПП). Их можно рассчитать с использованием MODTRAN для пространства параметров атмосферы и условий наблюдения с мелким шагом разбиения и использовать в качестве lookup tables. Однако, такой подход потребует хранения колоссального объёма данных (до сотни гигабайт). В качестве альтернативы, как показано в [40–42], для восстановления этих спектров предлагается метод опорных спектров. Опорным будем называть такой спектр, воздействуя на который некоторой функцией преобразования (ФП), можно получить искомый спектр. Опорные спектры могут быть выбраны из семейства искомых спектров, либо являться иной спектральной зависимостью, связанной с искомым спектром. Они могут быть рассчитаны на MODTRAN для заданных значений параметров атмосферы, ПП и условий наблюдения или получены на предыдущем этапе вычислений. Таким образом, задача

восстановления искомым спектров излучения сводится к выбору опорного спектра (или спектров) и получению аппроксимаций функций преобразования.

Функции преобразования, связывающие опорный спектр с искомым, по сути являются операторами. Математически это можно представить в виде следующего уравнения:

$$S(\lambda, p) = \widehat{K} S_0(\lambda, p_0), \quad (3.1)$$

где $S_0(\lambda, p_0)$ — опорный спектр, определённый для заданных значений параметров атмосферы, ПП и условий наблюдений p_0 , $S(\lambda, p)$ — искомый спектр для произвольных значений параметров p , \widehat{K} — оператор преобразования.

Алгоритм восстановления поглощённой ПП энергии с использованием опорных спектров состоит из следующих этапов:

- восстановления потоков падающего на ПП прямого излучения;
- восстановление интенсивности излучения на ВГА при нулевом и единичном альбедо;
- восстановление спектрального альбедо ПП;
- восстановление падающего на ПП рассеянного излучения;
- восстановление поглощённой ПП энергии в соответствии с 1.13.

В качестве исходных данных используются спектр солнечного излучения на ВГА (спектральная солнечная постоянная [105]), спутниковые данные спектрометра MODIS о состоянии атмосферы и условий наблюдения, функции чувствительности каналов и набор выбранных опорных спектров.

3.1.2. Аппроксимация функций преобразования

ФП должна представлять собой достаточно гладкую функцию, общий вид которой может быть записан как

$$f = f(\lambda, \tau, w, \theta, \beta, \phi, a_s), \quad (3.2)$$

где τ — АОТ, w — полное содержание водяного пара в столбе атмосферы, г/см^2 , θ — солнечный зенитный угол (СЗУ), β — зенитный угол наблюдения (ЗУН), ϕ — относительный азимутальный угол (ОАУ) Солнца и спутникового прибора, a_s — альbedo ПП. Уравнение (3.2) можно переписать в виде

$$f = f(\lambda, p), \quad (3.3)$$

где $p \in P = \{\tau, w, \theta, \beta, \phi, a_s\}$ — некоторая точка в пространстве параметров сопровождения, определяющих условия наблюдения, свойства атмосферы и ПП. Необходимо отметить, что эта функция в ряде случаев допускает редукцию размерности входящих в неё параметров путём представления в виде $f = \prod f_i$, где f_i зависит только от части параметров.

MODTRAN позволяет рассчитывать опорные спектры и искомые спектры для заданных значений $p_i \in P$, для которых можно вычислить соответствующие функции преобразования, представляемые в виде числовых массивов. Таким образом, задача аппроксимации состоит в нахождении коэффициентов ФП для произвольных значений p по набору коэффициентов ФП, вычисленных для заданных значений $p_i \in P$. Её решение возможно различными способами. Например, для произвольных значений p можно найти ближайшие к ним $f(\lambda, p_i)$ из вычисленного набора ФП и, путём линейной интерполяции на каждой длине волны, восстановить искомую $f(\lambda, p)$. Однако, для реализации этого способа необходимо хранить большие массивы исходных данных, а точность полученного решения будет невысокой.

Второй способ более эффективен и состоит из двух этапов. На первом выполняется аппроксимация $f(\lambda, p)$ по λ для каждого заданного значения p_i :

$$f_i = f_i(\lambda, k_i), \quad (3.4)$$

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, которые зависят от соответствующих значений p_i . Точки $p_i \in P$ удобно задавать в узлах сетки. Шаг разбиения

сетки пространства параметров P и необходимость применения равномерной или неравномерной сетки зависит от характера зависимостей $k^{(j)}(p)$. На втором этапе находятся зависимости $k^{(j)}(p)$ для произвольных значений параметров $p \in P$. Этот этап может быть реализован посредством двух разных подходов.

Подход на основе многомерной интерполяции позволяет найти $k(p) = \{k^{(1)}(p) \dots k^{(n)}(p)\}$ по вычисленному набору $k(p_i)$. Однако, его применение может привести к аномальным ошибкам из-за ложных выбросов на интерполирующих гиперповерхностях, обусловленных видом интерполирующей функции. Такое явление может наблюдаться при редком шаге разбиения пространства P и наличии на интересующем участке резких изменений градиента функции $k(p)$, когда значения коэффициентов в смежных узлах сетки претерпевают сильные перепады, и поведение функции между узлами интерполяции может существенно отличаться от поведения интерполяционного многочлена. Исключить данный эффект можно путём уменьшения шага разбиения пространства параметров, однако при этом число узлов при большой размерности этого пространства резко возрастет, что нивелирует преимущества метода интерполяции.

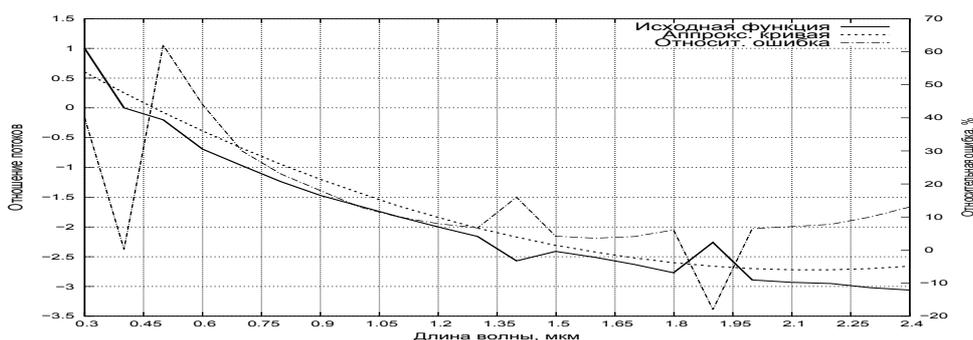
Аппроксимационный подход позволяет по найденным на первом этапе значениям $k(p_i)$ для каждого коэффициента $k^{(j)}(p)$ построить отдельную аппроксимацию, имеющую два варианта реализации. В первом производится одновременная аппроксимация по всем компонентам вектора p , от которых зависят $k^{(j)}$. Во втором аппроксимация выполняется последовательно, через плазовые поверхности. Для этого сначала ищется аппроксимация $k^{(j)}$ от одного из компонентов $p^{(q)}$ 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 $k(p)$. Эта процедура повторяется для всех компонентов вектора k , а затем вычисляется вид функции $f(\lambda, p)$.

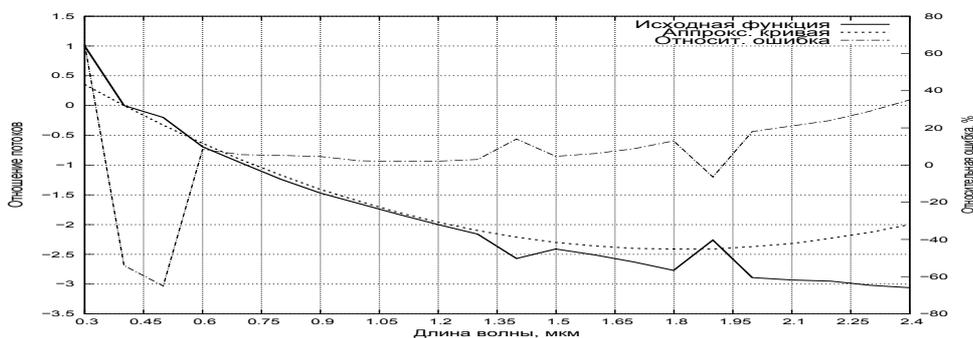
В процессе аппроксимации происходит естественное сглаживание резких перепадов, что приводит к уменьшению величин выбросов, возможных при интерполяции. Кроме того, обусловленные смещением значений коэффициентов в узлах сетки ошибки аппроксимации легко контролируются и могут быть минимизированы путём выбора иной аппроксимирующей функции. Анализ двух рассмотренных подходов говорит в пользу применения многоступенчатой аппроксимации. Использование многомерной интерполяции будет применяться тогда, когда невозможно понизить размерность ФП.

Критерии оценки точности аппроксимации определяют степень соответствия значения аппроксимирующей функции её модельному значению, рассчитанному в MODTRAN при тех же параметрах сопровождения. Типичным критерием является классический метод наименьших квадратов (МНК) [109–112], реализуемый различными программными продуктами, в том числе Scilab, используемым в данной работе. Также к числу используемых критериев относятся относительная, нормированная (приведённая) ошибки аппроксимирующей функции [113, 114] и их максимальные значения, а также средние значения их модулей. Учитывая, что ФП представляет собой сложную спектральную зависимость, представляющими собой отношение спектров или логарифмы их отношений, выбор правильного критерия позволяет повысить устойчивость получаемых решений [115]. Например, если аппроксимирующая функция описывает отношение спектров, она всегда положительна, и для неё удобно применять относительную ошибку. Если же ФП знакопеременна, что имеет место при логарифмировании отно-

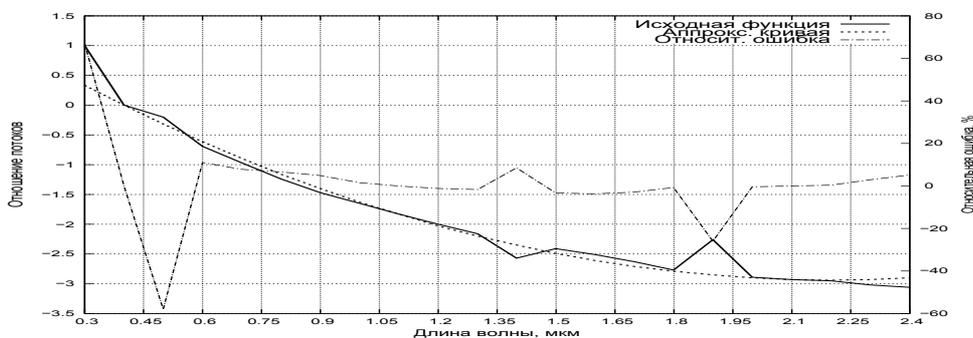
шения спектров, возможны ситуации, когда при близких к нулю значениях ФП относительная ошибка может принимать большие значения, нарушающие устойчивость получаемых решений. В этом случае лучше применять ошибку аппроксимации, нормированную на диапазон изменения функции (аналог приведённой погрешности). Пример влияния выбора критерия на вид аппроксимирующей функции приведён на рис. 3.1.



(а) Аппроксимация по критерию минимума модуля максимальной абсолютной ошибки



(б) Аппроксимация по критерию минимума модуля максимальной относительной ошибки



(с) Аппроксимация по критерию минимума среднего значения модуля относительной ошибки

Рис. 3.1. Три варианта аппроксимации логарифма отношения спектров падающих рассеянного и прямого потоков излучения

Для минимизации ошибки восстановления величины поглощённой энергии, которая определяется путём интегрирования спектров излучения по всему интересующему диапазону длин волн, важны интегральные критерии. Для восстановления же значений альбедо важны минимаксные критерии на всём спектральном диапазоне. Поэтому все рассмотренные критерии следует применять в комплексе, переходя фактически к решению задачи многокритериальной оптимизации [115].

Ещё одним фактором, приводящим к смещению аппроксимирующей функции относительно исходной зависимости, является нарушение **гладкости поведения ФП** в полосах поглощения воды, узких спектральных линиях кислорода и других компонентов атмосферы. В результате на таких аномальных участках локальные критерии аппроксимации (т.е. такие, значения которых зависят от длины волны) получают экстремально большие значения, что оказывает существенное влияние на интегральный критерий и приводит к смещению в значениях коэффициентов аппроксимации. Поскольку полоса пропускания каналов спектрорадиометра составляет не менее 20 нм, исключить влияние отдельных узких пиков поглощения можно путём применения линейных фильтров, реализующих метод скользящего среднего с шириной окна 15-20 нм, либо специально разработанного для этих целей нелинейного КИХ-фильтра, основанного на анализе градиента изменения значения ФП. Достаточным же может оказаться маскирование ФП, которое сводится к удалению участков с аномальным поведением. Исключение этих участков не нарушает общего характера поведения аппроксимируемой функции в силу её монотонности и гладкости на остальной области. Кроме того, в полосах поглощения энергия излучения крайне мала, восстанавливать величину альбедо на них не имеет смысла.

Описанная методика аппроксимации является общей для восстановления искомым спектров, но может корректироваться с учётом особенностей решаемой задачи. Аппроксимация выполнялась с помощью программных

модулей, позволяющих отображать и выбирать опорные спектры, подбирать для них ФП, накладывать маску, выбирать границы спектральных участков для аппроксимации и соответствующие им полиномы, рассчитывать коэффициенты аппроксимации и оценивать точность аппроксимации с помощью выбранных критериев.

3.2. Восстановление спектра прямого падающего излучения

Поток прямого падающего на ПП излучения представляет собой долю излучения, которое не претерпело рассеяния на всём пути от ВГА до поверхности Земли. Процесс поглощения излучения в атмосфере в первом приближении может быть записан в соответствии с законом Бугера-Ламберта-Бера [97]:

$$F_{dir}(\lambda) = F_{sun}(\lambda)e^{-k(\lambda)l_0/\cos\theta}, \quad (3.5)$$

где $F_{sun}(\lambda)$ — солнечная постоянная, $F_{dir}(\lambda)$ — поток прямого излучения после прохождения в поглощающей среде расстояния $l_0/\cos\theta$, θ - солнечный зенитный угол, а $k(\lambda)$ — коэффициент поглощения, зависящий от природы и состава поглощающего вещества и длины волны λ .

Процесс поглощения излучения в атмосфере можно описать, используя функцию пропускания атмосферы $T(\lambda)$ [97]:

$$F_{dir}(\lambda) = F_{sun}(\lambda)T(\lambda) \quad (3.6)$$

На основании (3.5) и (3.6) функцию пропускания атмосферы можно представить в виде

$$T(\lambda) = e^{-k(\lambda)\frac{l_0}{\cos\theta}}. \quad (3.7)$$

Известно [97, 116], что функция пропускания атмосферы T представляет собой произведение частных функций пропускания её компонентов T_i :

$$T = T_1 \cdot T_2 \dots T_n, \quad (3.8)$$

и для каждой T_i будет справедливо соотношение (3.7).

Коэффициент поглощения для каждого компонента атмосферы равен

$$k_i(\lambda) = c_i \cdot s_i(\lambda), \quad (3.9)$$

где c_i — параметр, количественно отражающий содержание и поглощающие свойства компонента атмосферы, например, для аэрозоля — АОТ, для водяного пара — полное его содержание в столбе атмосферы;

$s_i(\lambda)$ характеризует спектральный вид функции пропускания компонента атмосферы при заданном его значении.

Запишем выражение (3.7) для опорного спектра T_{i0} при фиксированных значениях коэффициента c_{i0} и зенитного угла θ_{i0} :

$$T_{i0} = \exp\left(-\frac{c_{i0}l_0}{\cos\theta_{i0}}s_i(\lambda)\right), \quad (3.10)$$

откуда получим:

$$s_i(\lambda) = -\frac{\cos\theta_{i0}}{c_{i0}l_0} \cdot \ln T_{i0}. \quad (3.11)$$

Тогда, исходя из (3.7) и (3.11), можно рассчитать функцию пропускания T_i для любых произвольных значений c_i и θ_i :

$$T_i = \exp\left(\frac{c_i}{\cos\theta_i} \frac{\cos\theta_{i0}}{c_{i0}} \cdot \ln T_{i0}\right), \quad (3.12)$$

или

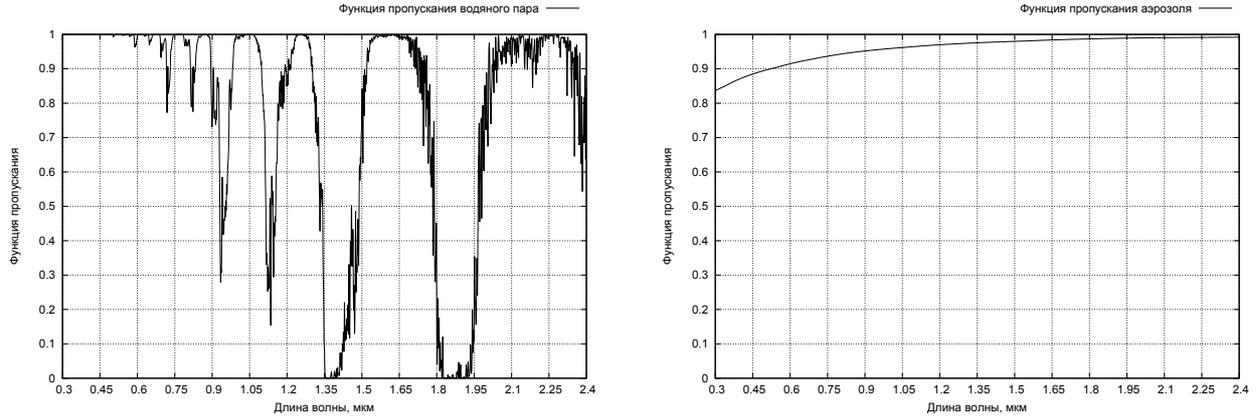
$$T_i = T_{i0}^{\frac{\cos\theta_{i0}}{c_{i0}} \cdot \frac{c_i}{\cos\theta_i}} \quad (3.13)$$

Для краткости это выражение можно записать через оператор преобразования \widehat{C} :

$$T_i = \widehat{C}T_{i0} \quad (3.14)$$

На рис. 3.2 приведены примеры функций пропускания составляющих атмосферы (водяного пара и аэрозоля).

Анализ зависимостей функций пропускания атмосферы от вариации её компонентов показал [40, 42], что наиболее значимыми являются АОТ и



(a) Водяной пар

(b) Аэрозоль

Рис. 3.2. Функции пропускания компонентов атмосферы

полное содержание водяного пара, другие же параметры не оказывают существенного влияния на функцию пропускания в рассматриваемом спектральном диапазоне. Поэтому при расчёте спектра прямого падающего излучения можно ограничиться тремя функциями пропускания, восстановленными через опорные спектры: АОТ, водяного пара и остальных составляющих атмосферы. Причём для первых двух рассчитываются операторы преобразования, а последний нормируется на фактический солнечный зенитный угол.

Исходя из этого и в соответствии с выражениями (3.6), (3.8) и (3.13) рассчитывается спектр потока прямого падающего излучения:

$$F_{dir} = F_{sun} \cdot \widehat{W} T_{water0} \cdot \widehat{A} T_{aer0} \cdot T_{atm0}|_{\theta} \cdot \cos \theta, \quad (3.15)$$

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 ($T_{atm0}|_{\theta} = T_{atm0} \cdot e^{\frac{\cos \theta_0}{\cos \theta}}$). Опорные спектры T_{water0} , T_{aer0} , T_{atm0} рассчитываются с помощью MODTRAN.

Для валидации предложенной методики восстановленный спектр прямого падающего излучения сравнивался с модельным, рассчитанным в MOD-

TRAN при одних и тех же параметрах атмосферы и условиях наблюдения. На первом этапе определялся реальный диапазон изменения параметров атмосферы и выбирались их характерные значения для расчёта опорных спектров. Для этого был использован ряд спутниковых данных о полном содержании водяного пара в столбе атмосферы и АОТ с различных территорий, взятых с FTP NASA (Западная Сибирь, Центральная Европа и Средиземное море, Южная и Северная Америки — см. табл. 3.1) в разные времена года.

Таблица 3.1

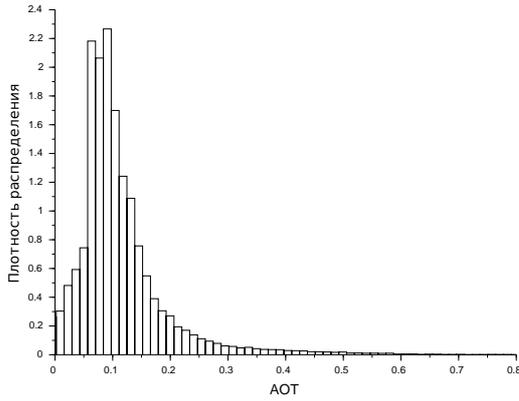
Территории для анализа диапазонов изменения параметров.

Регион	Координаты центра	Дата съёмки
Западная Сибирь	56,36° с.ш., 80,68° в.д.	5.06.15
Центральная Европа	48,02° с.ш., 15,47° в.д.	29.05.15
Южная Америка	32,27° ю.ш., 55,83° з.д.	21.06.15
Северная Америка	37,93° с.ш., 94,11° з.д.	19.10.14

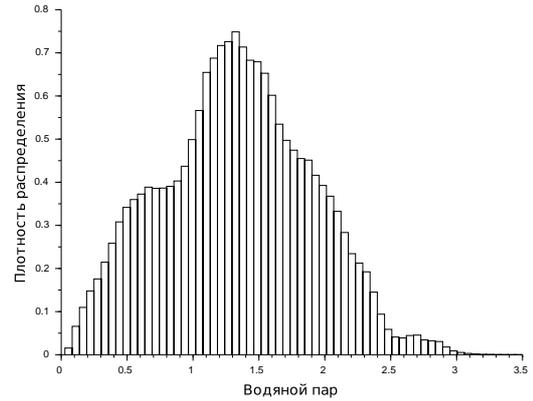
Анализ полученных функций распределения этих параметров на выбранных территориях (примеры которых представлены на рис. 3.3) показал, что характерное значение полного содержания водяного пара составляет 1.3 г/см² при диапазоне изменения от 0.2 до 3 г/см², АОТ — 0.1 при диапазоне от 0.02 до 0.8. Оценка ошибок данной методики проводилась в диапазоне изменения этих параметров.

В качестве критериев валидации использовались следующие ошибки. Среднее по длинам волн значение относительной ошибки, вычисленной как разница восстановленного значения потока $F_{\text{восст } i}$ и модельного F_{Mi} рассчитанного в MODTRAN для каждой из N длин волн:

$$\Delta_{\text{отн.ср.}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (F_{\text{восст } i} - F_{Mi}) / F_{Mi} \cdot 100\%, \quad (3.16)$$



(a) АОТ



(b) Водяной пар

Рис. 3.3. Гистограммы распределения АОТ и водяного пара на территории Центральной Европы

а также её максимальное и минимальное значения. Среднее значение приведённой ошибки, которая вычисляется относительно максимального значения потока F_{Mmax} :

$$\Delta_{\text{прив.ср.}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (F_{\text{восст } i} - F_{Mi}) / F_{Mmax} \cdot 100\%. \quad (3.17)$$

Величина данной ошибки влияет на точность восстановления поглощённой ПП энергии на конкретном участке спектрального диапазона. Интегральная ошибка, влияющая на точность восстановления поглощённой ПП энергии на всём спектральном диапазоне

$$\Delta_{\text{интегр.}} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} F_{\text{восст}} d\lambda - \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} F_M d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} F_M d\lambda} \cdot 100\%. \quad (3.18)$$

Результаты валидации приведены в таблице 3.2.

Результаты валидации.

Водяной пар, г/см ²	АОТ	СЗУ, град.	$\Delta_{\text{отн.ср.}}, \%$	$\Delta_{\text{прив.ср.}}, \%$	$\Delta_{\text{интегр.}}, \%$
0.2	0.02	0	2.8261	1.1209	3.7008
0.2	0.02	30	2.4611	1.1094	3.5735
0.2	0.02	70	0.9573	0.9639	1.9532
0.2	0.8	0	1.9327	1.2713	5.6818
0.2	0.8	30	2.3923	1.4843	5.8958
0.2	0.8	70	2.2151	1.8967	8.8451
3.0	0.02	0	1.9385	1.6982	1.8211
3.0	0.02	30	1.5668	1.5332	1.3400
3.0	0.02	70	0.2384	1.2581	-3.3339
3.0	0.8	0	0.3779	1.2407	3.1590
3.0	0.8	30	0.3804	1.2178	2.8293
3.0	0.8	70	-0.2994	1.1292	0.4048

3.3. Восстановление спектра падающего рассеянного излучения

3.3.1. Выбор опорного спектра

В качестве опорного спектра рассматривались два варианта: спектр падающего рассеянного излучения, рассчитанный с помощью MODTRAN при заданных значениях параметров атмосферы и условиях наблюдения, и спектр прямого падающего излучения, восстановленный на предыдущем этапе [97, 116]. Отношение двух спектров рассеянного излучения при различных значениях АОТ и СЗУ, представленное на рис. 3.4, не является гладкой функцией, следовательно, спектр рассеянного излучения не может быть выбран в качестве опорного.

На рис. 3.5 представлены спектры прямого и рассеянного потоков излучения при предельных значениях параметров АОТ и СЗУ (графики показывают значительное влияние АОТ и СЗУ на спектр рассеянного излучения). Отношение спектров рассеянного излучения к прямому представляет собой гладкую функцию во всём диапазоне длин волн, кроме участков поглощения водяным паром (рис. 3.6), но слишком большая крутизна этих кривых затрудняет их аппроксимацию полиномами. Для её уменьшения

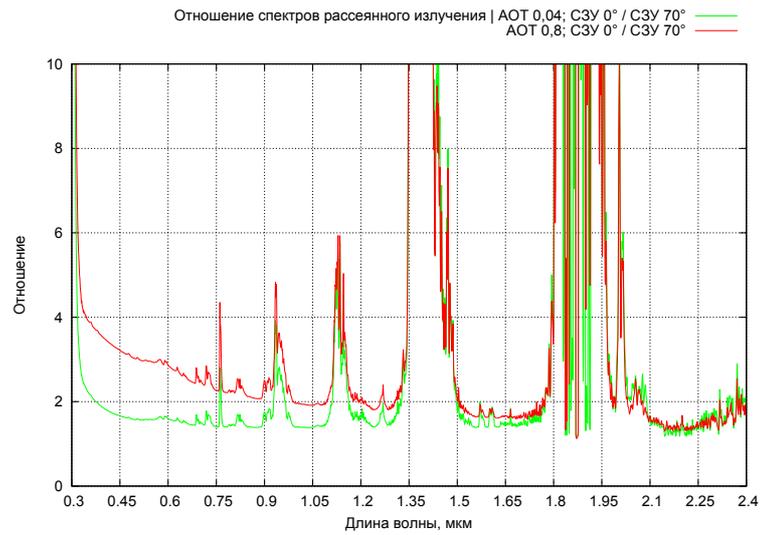
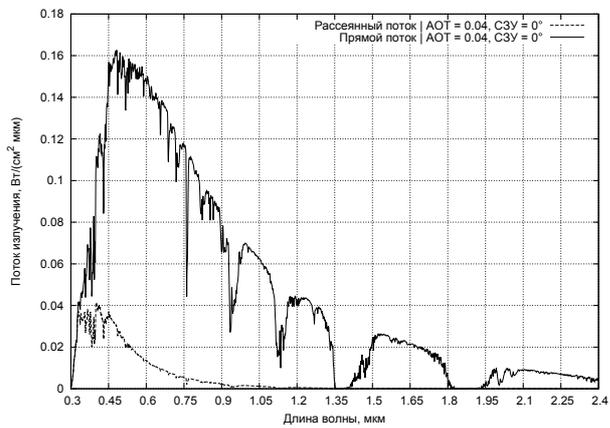
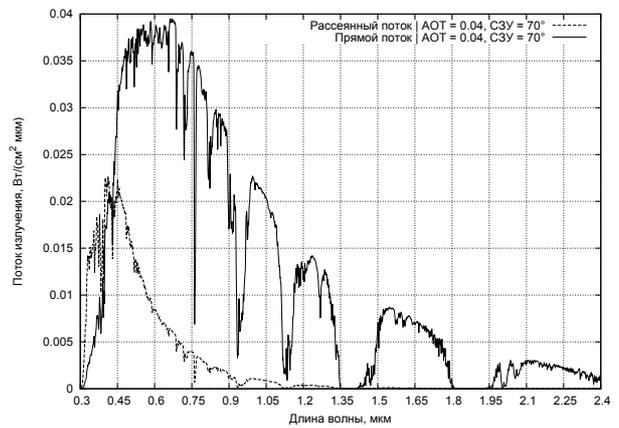


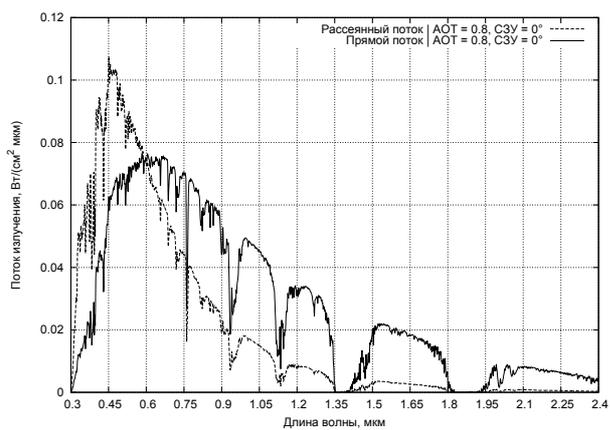
Рис. 3.4. Отношение спектров потоков рассеянного излучения



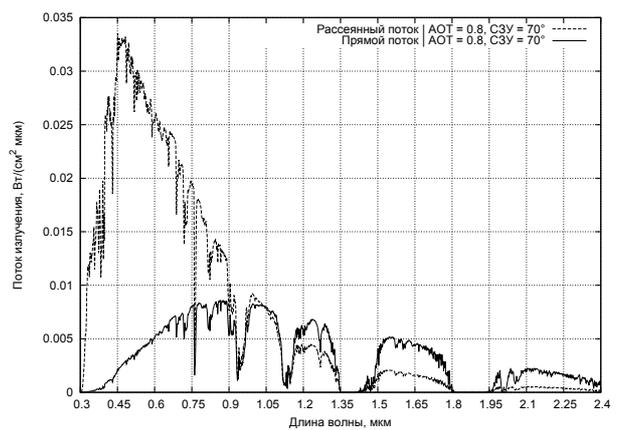
(a) AOT 0,04, CЗУ 0°



(b) AOT 0,04, CЗУ 70°

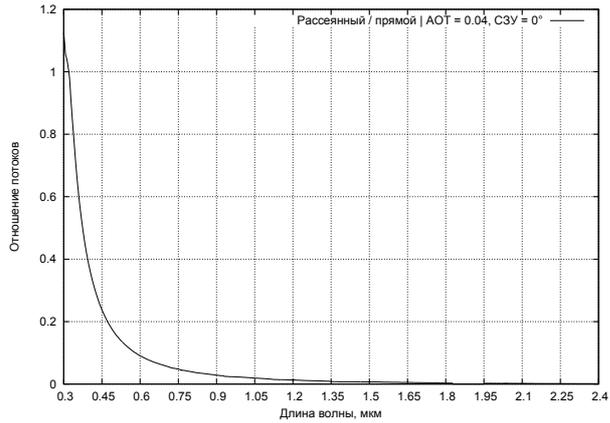


(c) AOT 0,8, CЗУ 0°

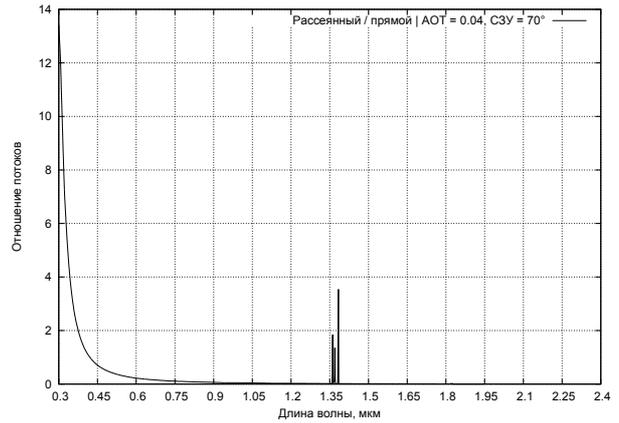


(d) AOT 0,8, CЗУ 70°

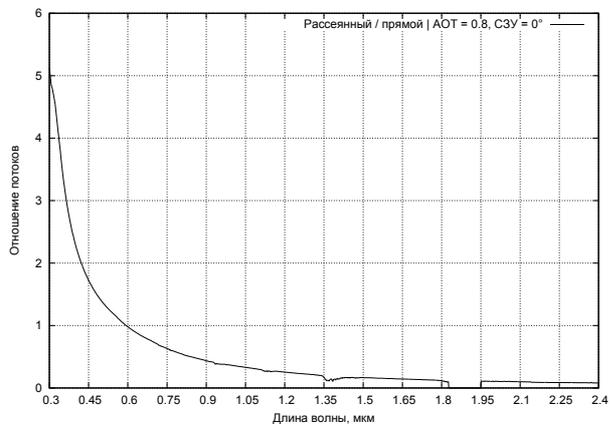
Рис. 3.5. Спектры потоков падающего прямого и рассеянного излучения при разных AOT и CЗУ



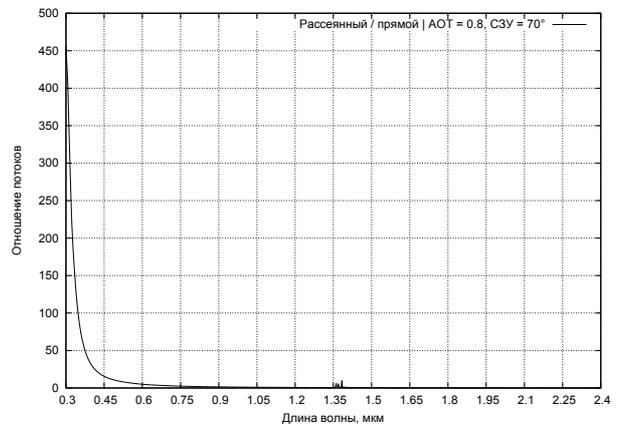
(a) AOT 0,04, CЗУ 0°



(b) AOT 0,04, CЗУ 70°



(c) AOT 0,8, CЗУ 0°



(d) AOT 0,8, CЗУ 70°

Рис. 3.6. Отношение спектров падающих рассеянного и прямого потоков излучения при разных параметрах AOT и CЗУ

берётся логарифм отношения спектров рассеянного и прямого потоков излучения (рис. 3.7). Данные кривые также являются гладкими функциями (за исключением зон поглощения водяным паром на 1.35 мкм и 1.8-1.95 мкм), которые могут быть описаны полиномами, коэффициенты которых являются функциями от AOT, CЗУ, водяного пара и альбедо ПП. Таким образом, в качестве опорного спектра выбирается спектр прямого падающего потока излучения.

Для определения возможности редукции размерности параметров аппроксимации рассмотрим влияние водяного пара и альбедо ПП на поток рассеянного излучения. На рис. 3.8 приведены кривые логарифма отношения спектров рассеянного и прямого потоков излучения при разных зна-

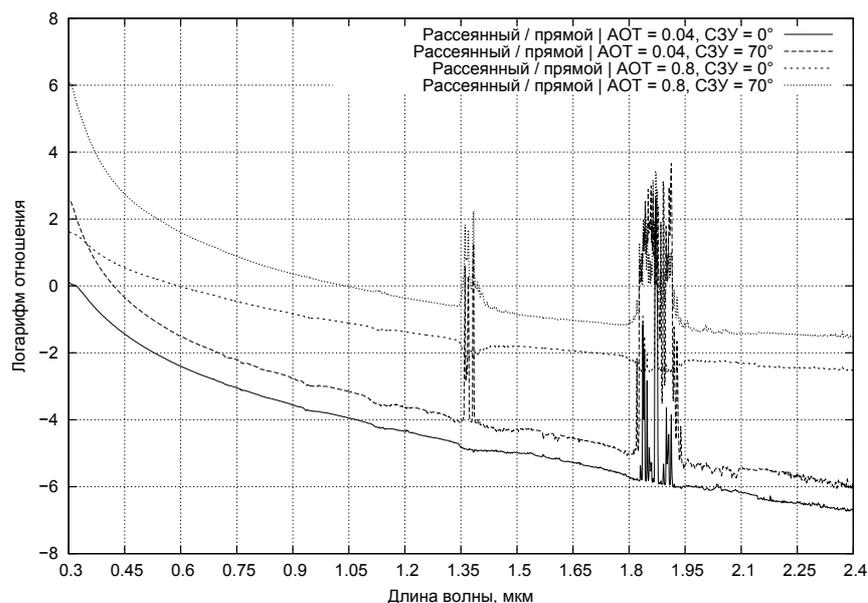


Рис. 3.7. Логарифм отношения спектров падающих рассеянного и прямого потоков излучения при разных параметрах АОТ и СЗУ

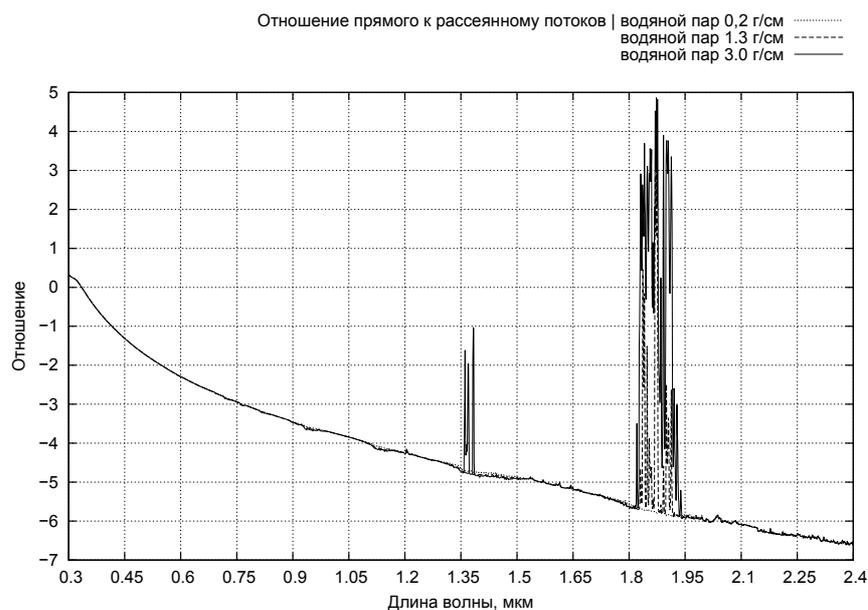


Рис. 3.8. Логарифм отношения спектров падающих рассеянного и прямого потоков излучения в зависимости от количества водяного пара

чениях содержания водяного пара в столбе атмосферы, равных 0.2, 1.3 и 3 г/см², что соответствует минимальному, наиболее типичному и максимальному значениям этого параметра. Кривая остаётся неизменной на всём диапазоне длин волн за исключением участков сильного поглощения водяным

паром, на которых величина падающей энергии минимальна, а следовательно, влиянием водяного пара при аппроксимации ФП можно пренебречь (при вычислениях использовалось значение для водяного пара 1.3 г/см^2).

Аналогично, рассмотрим зависимость спектра рассеянного излучения от альбедо ПП. Такая зависимость обусловлена многократным рассеянием и переотражением от поверхности. На рис. 3.9 приведены примеры спектров падающего рассеянного излучения при разных значениях альбедо ПП.

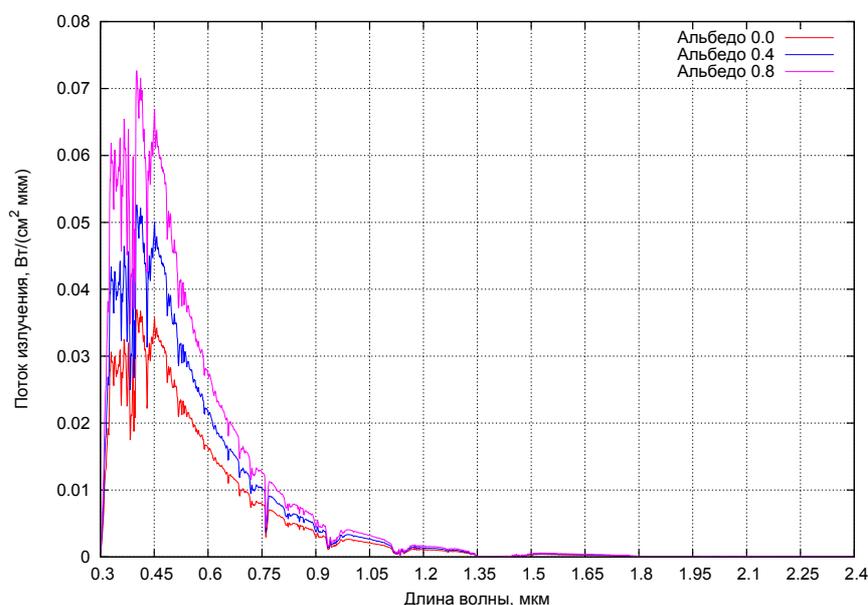


Рис. 3.9. Спектры потоков падающего рассеянного излучения при разных значениях альбедо ПП

Рассмотрев зависимость потока излучения от альбедо на срезе спектра при определённой длине волны (рис. 3.10), можно сделать вывод, что данная зависимость носит линейный характер, а следовательно, может быть учтена на финальном этапе аппроксимации. Таким образом, аппроксимация может быть проведена в два этапа: на первом рассчитывается рассеянное излучение при нулевом альбедо ПП, а затем проводится коррекция рассчитанного спектра на фактическое значение альбедо ПП.

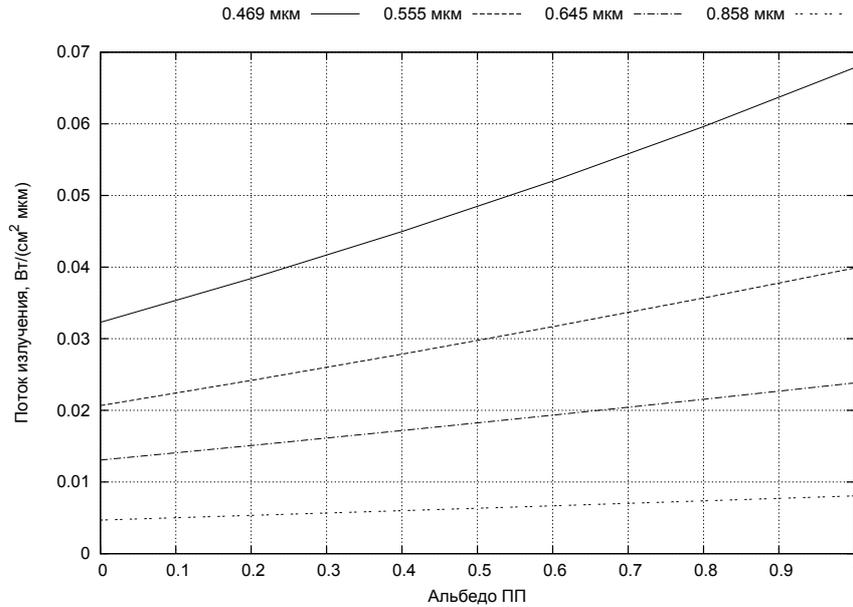


Рис. 3.10. Зависимость потоков падающего рассеянного излучения от альбедо ПП на разных длинах волн

3.3.2. Расчёт спектра падающего рассеянного излучения при нулевом альбедо

Поток падающего рассеянного излучения F_{diff} в соответствии с (3.1) можно представить в виде:

$$F_{diff} = e^{f_0(\lambda, p)} \cdot F_{dir}, \quad (3.19)$$

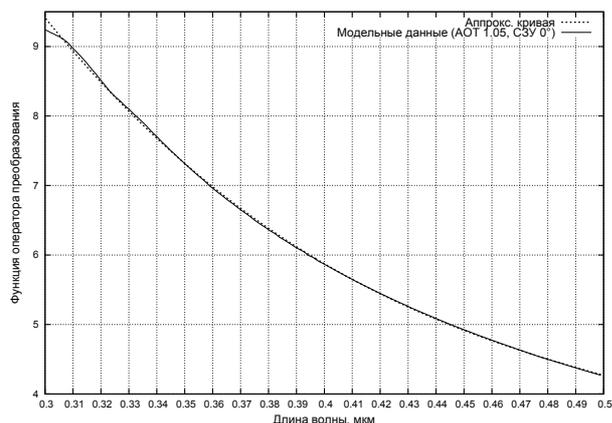
где $f_0(\lambda, p)$ — функция преобразования при нулевом альбедо, представляет собой логарифм отношения спектров рассеянного и прямого излучения.

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 $f_0(\lambda, k_i)$, где k_i — наборы коэффициентов аппроксимирующей функции. Для получения необходимой выборки этих функций строилась равномерная сетка из 240 узлов (8 значений СЗУ от 0° до 70° и 30 АОТ от 0,05 до 1.5). В качестве аппроксимирующей функции рассматривались полиномы не выше четвёртой степени и экспоненциальные функции. Ни одна из них не смогла обеспечить во всем спектральном диапазоне приемлемую

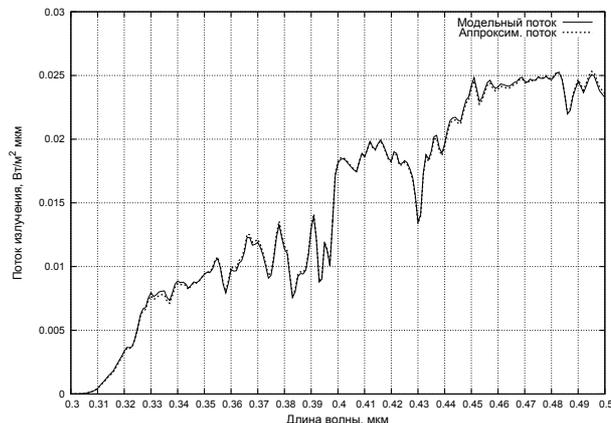
точность аппроксимации даже при увеличении числа коэффициентов аппроксимации.

Уточнённая методика аппроксимации, обеспечивающая необходимую точность, заключается в следующем:

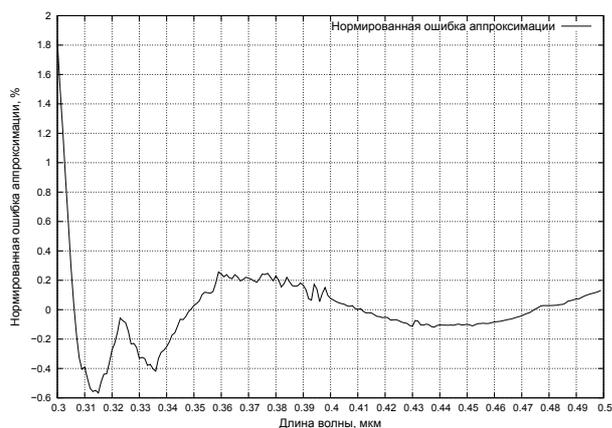
- ФП разбивалась на участки, для каждого из которых искалась своя аппроксимация. Ширина участков и степень используемого для аппроксимации полинома определялись экспериментально с помощью программного модуля, при этом анализировались как интегральные, так и зависящие от λ критерии. Пример подбора границ участков аппроксимации представлен на рис. 3.11;



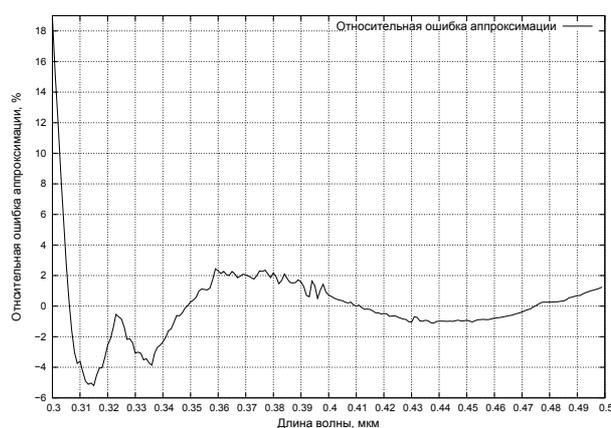
(а) Функция преобразования



(б) Модельный и аппроксимированный потоки



(с) Нормированная ошибка аппроксимации



(д) Относительная ошибка аппроксимации

Рис. 3.11. Пример работы программы по подбору границ участков аппроксимации

- для каждого узла сетки выполнялась аппроксимация ФП, находились значения $k^{(j)}(p_i)$ и анализировались критерии точности аппроксимации, примеры которых представлены на рис. 3.12. При неудовлетворительной точности корректировались число и положение границ участков аппроксимации либо степень аппроксимирующего полинома (предельные ошибки наблюдались на длинах волн, где интенсивность излучения крайне мала);

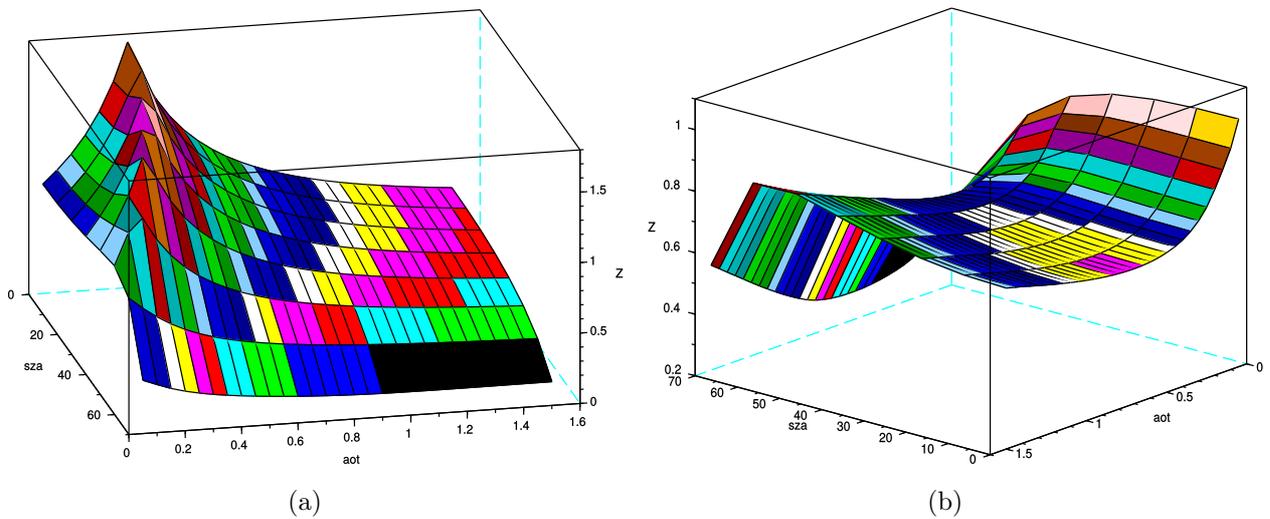


Рис. 3.12. Зависимости средних значений модулей ошибок аппроксимации функции $k^{(1)}(p_i)$ (a) и восстановленного F_{diff} от значений СЗУ и АОТ (b)

- зависимость $k(p)$ для произвольных значений аппроксимировалась двумерным кубическим полиномом и анализировались критерии аппроксимации ФП во всех узлах сетки пространства параметров. Если погрешность аппроксимации по интегральным или локальным критериям оказывалась неудовлетворительной из-за искривлённости поверхности $k(p)$, изменялись границы разбиения участков ФП.

Уточнённая методика позволила получить следующие результаты:

- Диапазон от 0.3 до 2.4 мкм был разделен на три участка с границами 0.3-0.5; 0.5-0.9 и 0.9-2.4 мкм, аппроксимируемых полиномами 3, 3 и 2 степени, соответственно.

- Для каждого из этих интервалов были рассчитаны значения коэффициентов полиномов $k^{(j)}(p_i)$ для всех узлов сетки пространства параметров. Примеры зависимостей этих коэффициентов от АОТ и СЗУ приведены на рис. 3.13(а).

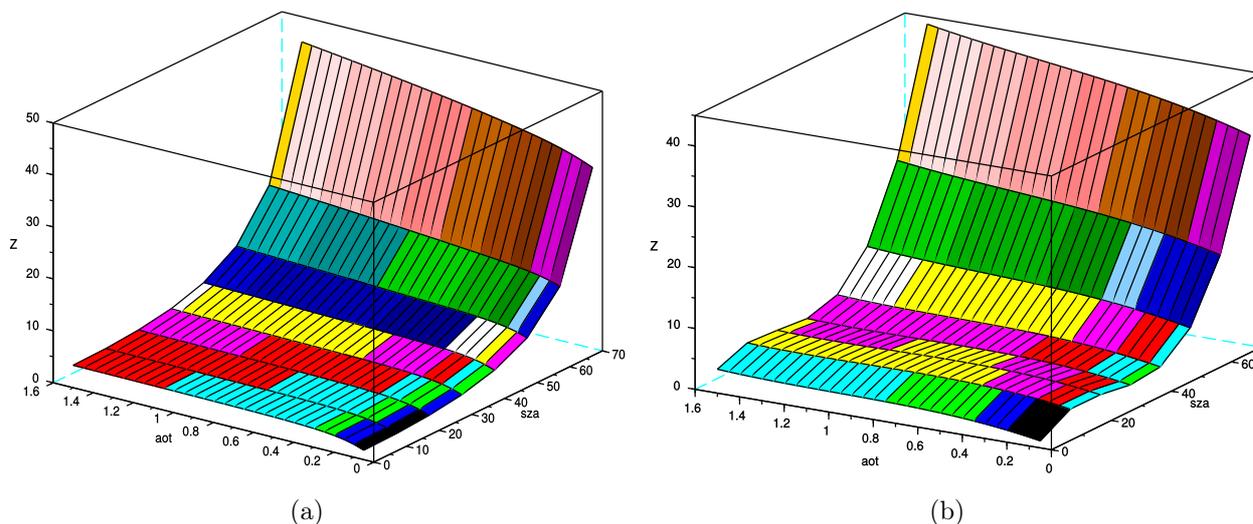


Рис. 3.13. Зависимость $k^{(1)}(p_i)$ для участка 0.3-0.5 мкм, рассчитанная по результатам аппроксимации функции $f(\lambda, p)$ в узлах сетки (а) и восстановленная после её аппроксимации двумерным кубическим полиномом $k(p)$ (б)

- По полученным наборам значений коэффициентов $k^{(j)}(p_i)$ аппроксимировались зависимости $k(p)$ двумерным кубическим полиномом вида (рис. 3.13(б))

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

Значения коэффициентов такой аппроксимации для каждого из участков приведены в Приложении Б.

3.3.3. Расчёт спектра падающего рассеянного излучения с учётом альбедо

Общую функцию преобразования для падающего рассеянного излучения с учётом альбедо ПП можно представить в виде произведения двух

функций $e^{f_0(\lambda, p)} \cdot k_{f_a}$. Аппроксимация первой была выполнена в предыдущем подразделе, вторую функцию k_{f_a} можно записать как

$$k_{f_a} = 1 + f_a(a) \cdot f_1(\lambda, p), \quad (3.20)$$

где $f_a(a)$ — функция, в первом приближении линейно зависящая от альбедо и принимающая значение 0 при $a = 0$ и 1 при $a = 1$:

$$f_a(a) = a \text{ для } a \in [0, 1], \quad (3.21)$$

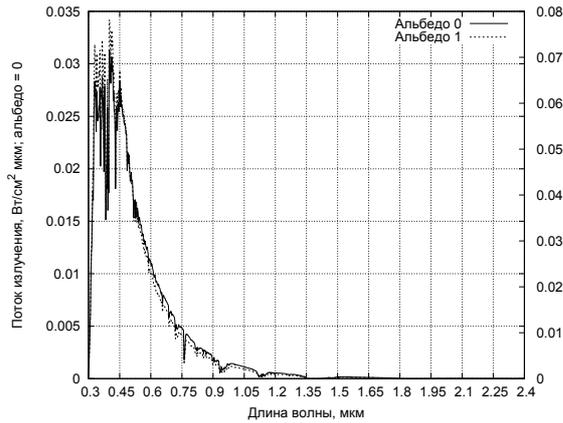
а $f_1(\lambda, p)$ показывает долю рассеянного излучения при $a = 1$. Тогда поток падающего рассеянного излучения можно записать в виде:

$$F_{diff} = (1 + f_a(a) \cdot f_1(\lambda, p)) \cdot e^{f_0(\lambda, p)} \cdot F_{dir}. \quad (3.22)$$

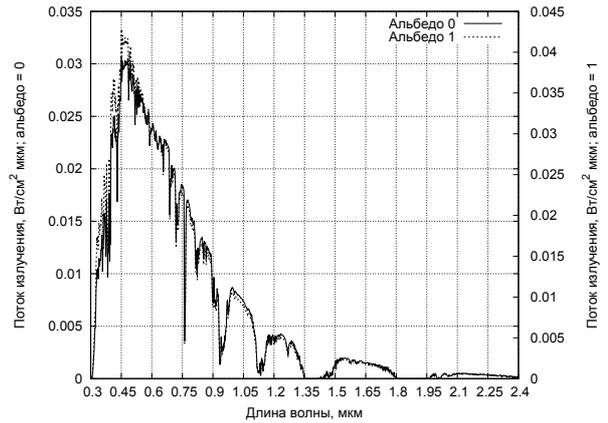
Аппроксимация ФП проводилась в два этапа. На первом этапе аппроксимировалась функция $f_1(\lambda, p)$, а на втором проверялась линейность выражения (3.21). Для установления вида функции $f_1(\lambda, p)$ в соответствии с (3.22) запишем отношение потоков рассеянного излучения для граничных значений альбедо ПП (0 и 1):

$$\frac{F_{diff1}}{F_{diff0}} = 1 + f_1(\lambda, p) \quad (3.23)$$

Рассмотрим поведение этих спектров и их отношения при изменении параметров p . Эти исследования проводились с помощью программного модуля, описанного в главе 4, с контролем $f_a(a)$ по длинам волн. При различных значениях параметров эти спектры сохраняли свою характерную форму, в том числе и для промежуточных значений альбедо (рис. 3.14). Отношение этих спектров (ФП) удовлетворительно описываются гладкими функциями (рис. 3.15). Провалами в полосах поглощения при высоких интенсивностях излучения можно пренебречь, поскольку они появляются при $\lambda > 900$ нм, где интенсивность в полосах поглощения, как это видно на рис. 3.14, падает более чем на порядок. Однако, при аппроксимации на эти участки нужно

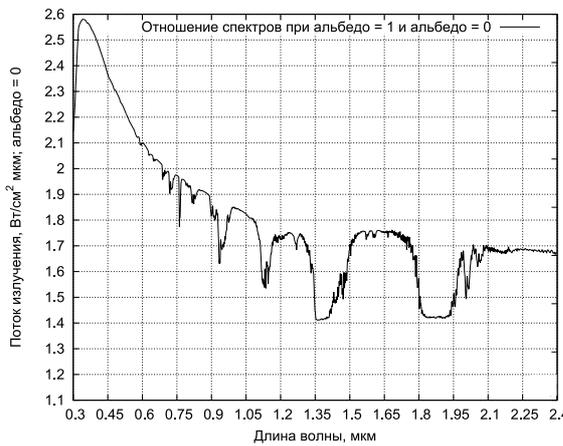


(a) AOT = 0.05, СЗУ = 0°

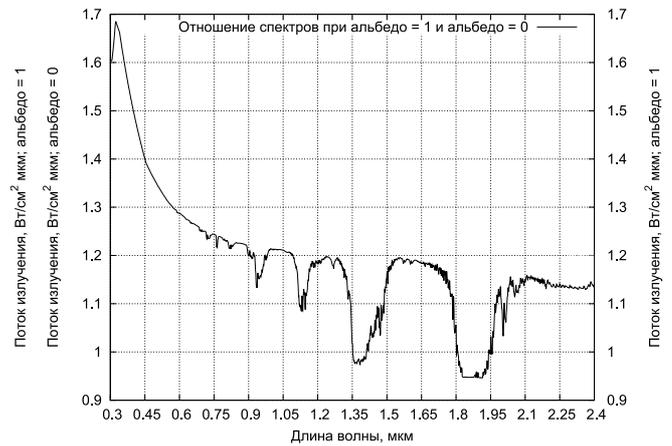


(b) AOT = 0.8, СЗУ = 70°

Рис. 3.14. Поток падающего рассеянного излучения при $a = 1$ и $a = 0$ для граничных значений параметров AOT и СЗУ



(a) AOT = 0.05, СЗУ = 0°



(b) AOT = 0.8, СЗУ = 70°

Рис. 3.15. ФП для граничных значений τ и θ

накладывать маску, чтобы исключить их влияние на вид аппроксимирующей функции. Также было установлено, что водяной пар не оказывает существенного влияния на вид функции $f_1(\lambda, p)$, следовательно, $P = \{\theta, \tau\}$ как и при нулевом альбедо.

На рис. 3.16 представлены семейства этих функций при разных СЗУ и AOT. В результате анализа этих зависимостей были выделены три спектральных участка: 0.3-0.345, 0.345-0.8 и 0.8-2.4 мкм, которые хорошо аппроксимируются полиномами второй, третьей и первой степени, соответственно.

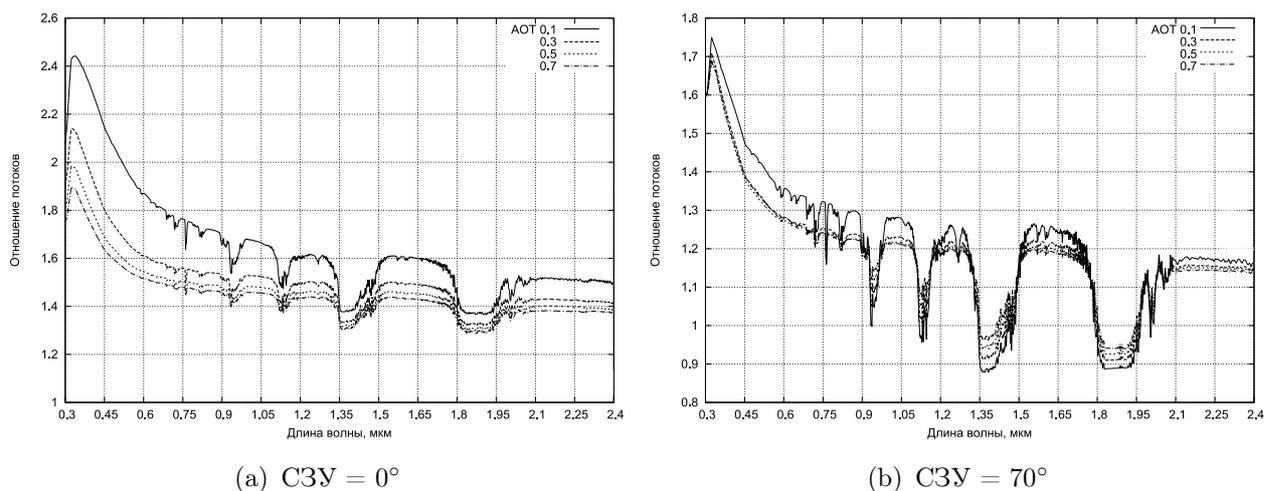


Рис. 3.16. Семейства функций $f_1(\lambda, p)$

Методика аппроксимации функции $f_1(\lambda, p)$ повторяет методику, описанную в предыдущем подразделе. Результаты, полученные по этой методике, в виде коэффициентов двумерного кубического полинома для всех трёх участков спектрального диапазона приведены в Приложении А.

На втором этапе оценивалась степень соответствия функции $f_a(a)$ линейной зависимости (3.21). Для этого были построены семейства корректирующих функций $f_a(a)$ для разных длин волн (рис. 3.17) и зависимости

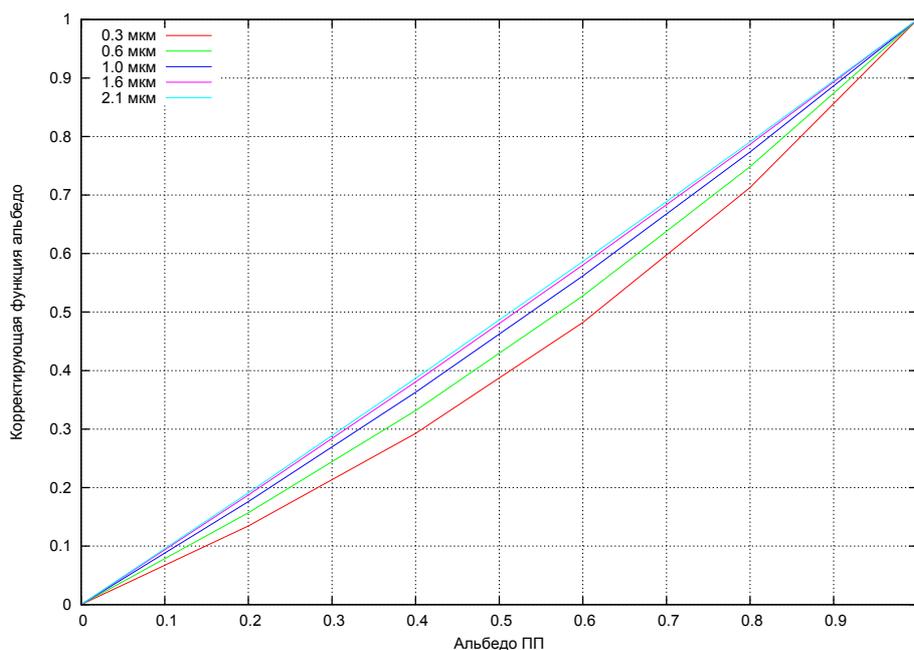


Рис. 3.17. Корректирующая функция альbedo на разных длинах волн

значений корректирующей функции $f_a(a)$ от длины волны при разных значениях альбедо для граничных значений АОТ и СЗУ (рис. 3.18). Анализ

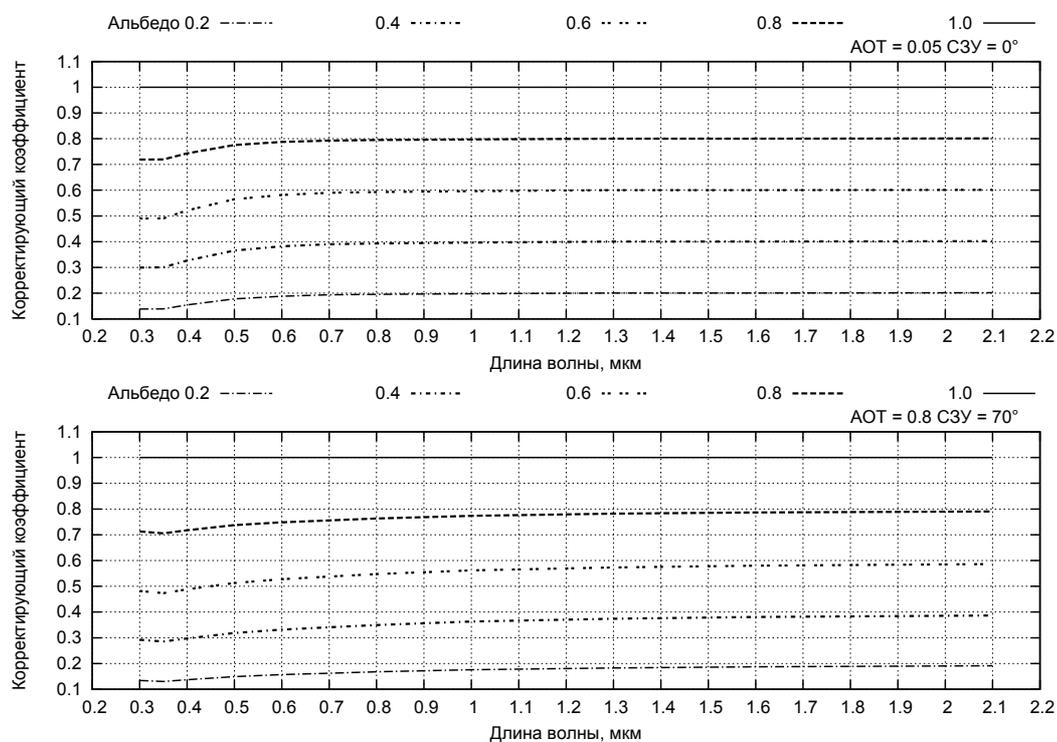


Рис. 3.18. Зависимость корректирующих коэффициентов от длины волны для разных альбедо и крайних значениях АОТ и СЗУ

полученных зависимостей показал, что сделанное предположение в целом верно, однако на коротких длинах волн (0.3-0.7 мкм) и при малых АОТ степень нелинейности становится достаточно заметной и достигает 10-15%. СЗУ и АОТ оказывают незначительное влияние на зависимость $f_a(a)$ от λ .

Для компенсации установленной нелинейности достаточной оказалась аппроксимация $f_a(a)$ квадратичной параболой. Учитывая, что её нелинейность, достигающая 10-15%, приводит к дополнительной ошибке восстановления потока рассеянного излучения порядка 2-3%, нахождение коэффициентов полинома производилось по упрощённой процедуре. Так коэффициенты полинома функции $f_a(a) = b_0 + b_1 a + b_2 a^2$ находились из условия равенства невязок нулю в трёх точках параболы: $f_a(0) = 0$, $f_a(1) = 1$, $f_a(a) = a$, где a — фиксированное значение, при котором величина отклонения функ-

ции от линейности максимальна. Для минимизации погрешности удобно взять a вблизи середины диапазона, а именно $a = 0.6$. При этом коэффициенты полинома находились из простых соотношений: $b_1 = (f_a(a) - a^2)/(a - a^2)$ и $b_2 = 1 - b_1$, $b_0 = 0$. Таким образом, при аппроксимации достаточно хранить лишь один коэффициент квадратичного полинома b_2 (поскольку постоянный член полинома равен нулю, а второй коэффициент определяется как $1 - b_2$), и для его нахождения нужен лишь единственный дополнительный отсчёт при $a = 0.6$.

На следующем шаге анализировалось поведение коэффициента b_2 полинома от длины волны. Его зависимость от λ для граничных значений СЗУ и АОТ приведена на рис. 3.19, из которого видно, что АОТ «затя-

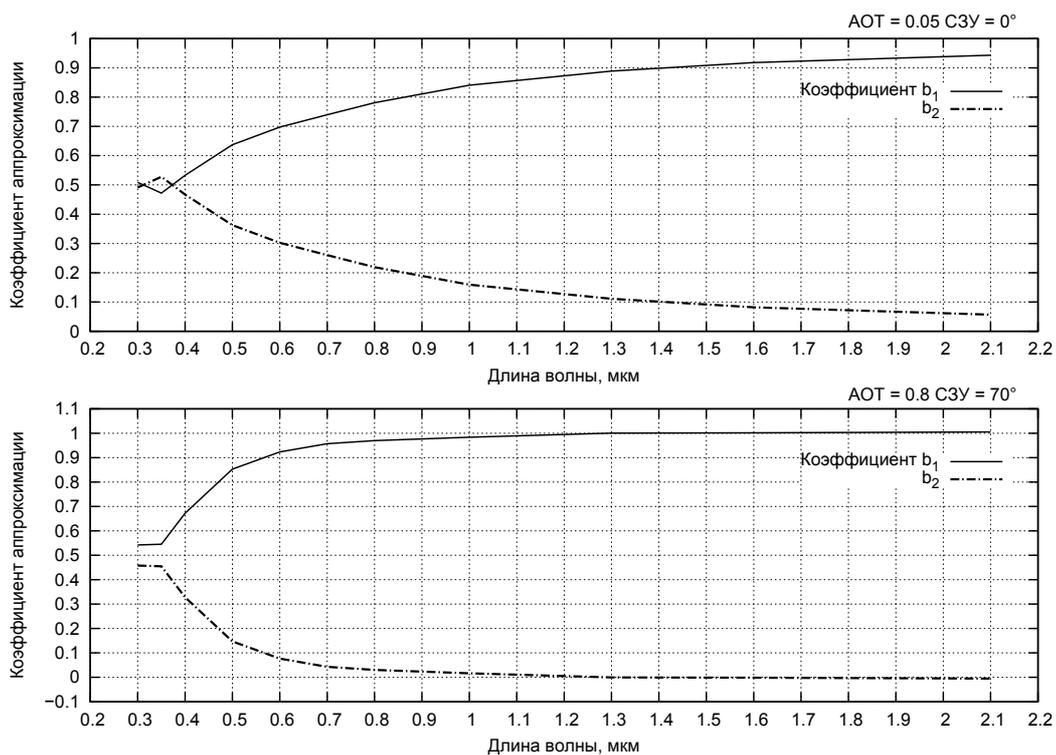


Рис. 3.19. Зависимость коэффициентов аппроксимации квадратичным полиномом от длины волны при крайних значениях АОТ и СЗУ

гивает» изменения b_2 от λ , СЗУ же лишь нарушает гладкость её формы и незначительно влияет на b_2 . Поэтому для корректировки b_2 по длине волны достаточно учитывать лишь АОТ. При этом на участке зависимо-

сти 300-330 нм b_2 можно считать постоянным и равным ≈ 0.5 , тогда как на остальной части данный вид зависимости хорошо аппроксимируется функцией $b_2(\lambda) = c_1 \exp(c_2(\lambda - \lambda_0)^{c_3}) + c_0$ (рис. 3.20). Даже при применении

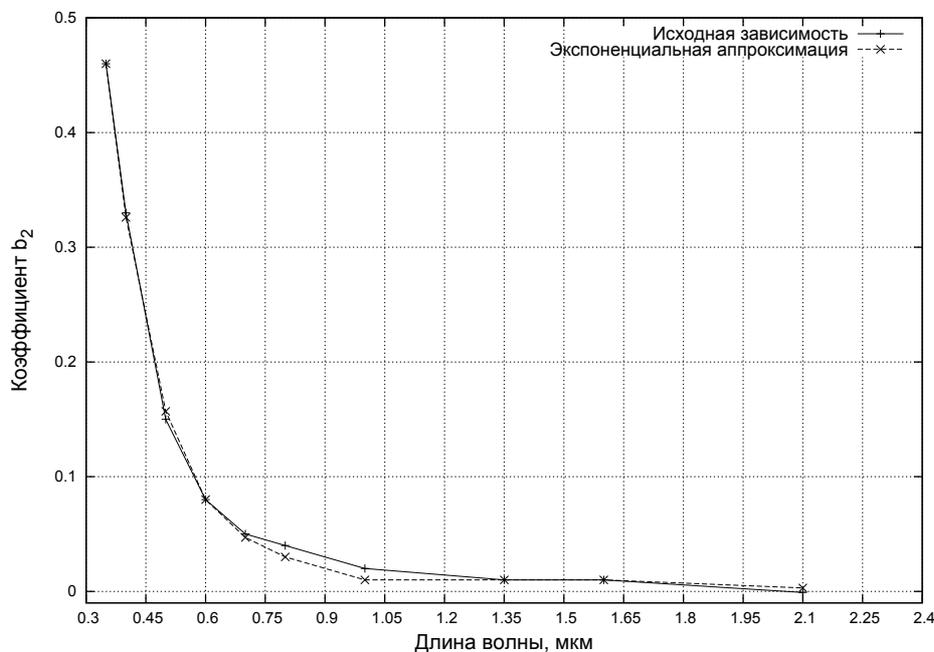


Рис. 3.20. Аппроксимация зависимости $b_2(\lambda)$ экспоненциальной функцией, АОТ=0,05, СЗУ=70°

упрощённой экспоненциальной функции с $c_0 = 0$, $c_3 = 1$ и $c_1 = 0.5$, относительная ошибка аппроксимации искомого спектра при типовых значениях АОТ уменьшилась примерно на порядок, а максимальная относительная по длинам волн более чем в два раза. При малых же АОТ относительная ошибка аппроксимации искомого спектра уменьшилась примерно в 2-3 раза.

3.4. Восстановление спектрального альbedo ПП

3.4.1. Алгоритм восстановления спектрального альbedo ПП

Предполагая, что в первом приближении спектр интенсивности на ВГА линейно зависит от альbedo ПП, алгоритм восстановления спектрального альbedo в соответствии с методикой раздела 2.3 состоит из следующих

этапов.

- Восстановление интенсивности на ВГА при нулевом и единичном альбедо L_{TOA0} , L_{TOA1} в соответствии с уточнённой методикой аппроксимации их ФП.
- Определение спектра интенсивности на ВГА (L_{TOA}) для произвольных значений параметров атмосферы и альбедо ПП в соответствии с выражением $L_{TOA}(a) = L_{TOA0} + (L_{TOA1} - L_{TOA0}) \cdot f_a(a)$, с уточнением линейности $f_a(a)$ и её аппроксимацией.
- Расчёт интенсивности L_i в каналах спектрорадиометра с учётом функций чувствительности каналов $f_{si}(\lambda)$.
- Минимизация невязки между рассчитанными L_i и измеренными на MODIS L_{MODi} интенсивностями в каналах путём подбора актуальных коррекции значений альбедо a_i в соответствии с итерационной методикой 2.3.
- Восстановление спектрального альбедо по его актуальным значениям с помощью сплайн-интерполяции.

3.4.2. Восстановление спектров интенсивности на ВГА при нулевом и единичном альбедо

В соответствии с предложенным алгоритмом искомыми спектрами являются интенсивности излучения на ВГА для граничных значений альбедо L_{TOA0} и L_{TOA1} . Опорными спектрами для них были выбраны интенсивности излучения на ВГА со следующими параметрами: $\{\tau = 0.2, \theta = 30^\circ, \beta = 40^\circ, \phi = 180^\circ, a = 0\}$ и $\{\tau = 0.2, \theta = 30^\circ, \beta = 40^\circ, \phi = 180^\circ, a = 1\}$, рассчитанными с использованием MODTRAN. Анализ этих спектров и их отношений, зависящих от водяного пара, АОТ, геометрии сцены (СЗУ, ЗУН, ОАУ), показал, что провести редукцию размерности параметров для аппроксимации невозможно. Уточнённая методика аппроксимации L_{TOA1} и L_{TOA0} заключается в следующем.

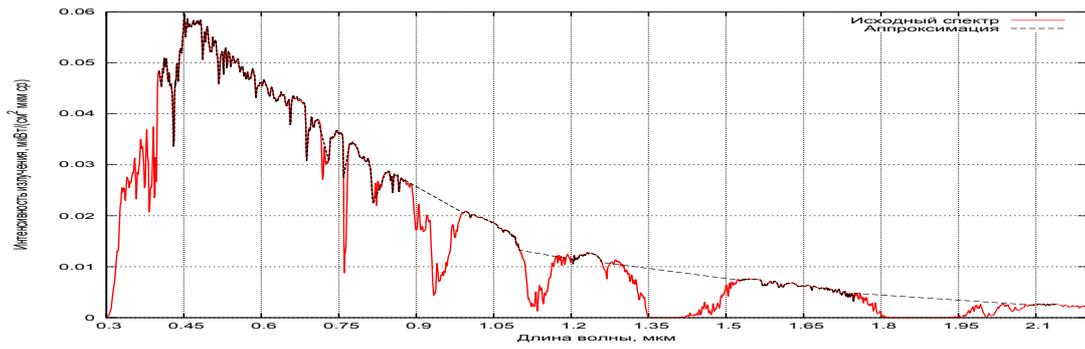
- Учитывая, что актуальные значения альбедо восстанавливаются толь-

ко по откликам в каналах спектро радиометра, нет необходимости восстанавливать эти спектры во всём спектральном диапазоне. На аппроксимируемые спектры накладывается 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 выбираются так, чтобы максимально исключить из рассмотрения участки спектров с сильным поглощением, на которых обычно отсутствуют каналы спутниковых приборов. (Так как на оставшихся участках влияние водяного пара на искомые спектры излучения пренебрежимо мало (что было рассмотрено в 2.1), в дальнейших расчётах его значение принимается равным 1.3 г/см^2 .)

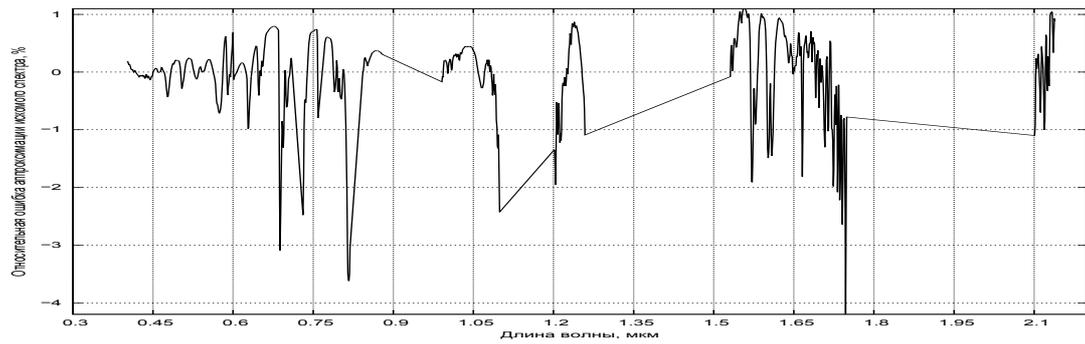
- Анализ ФП показал необходимость разбиения их на три спектральных участка, которые могут аппроксимироваться полиномами.
- Критериями точности аппроксимации ФП и восстановления искомого спектров служили относительные ошибки, а также минимаксные критерии.
- Восстановление ФП для произвольных значений p осуществляется с использованием многомерной интерполяции.

В соответствии с уточнённой методикой было выполнено следующее.

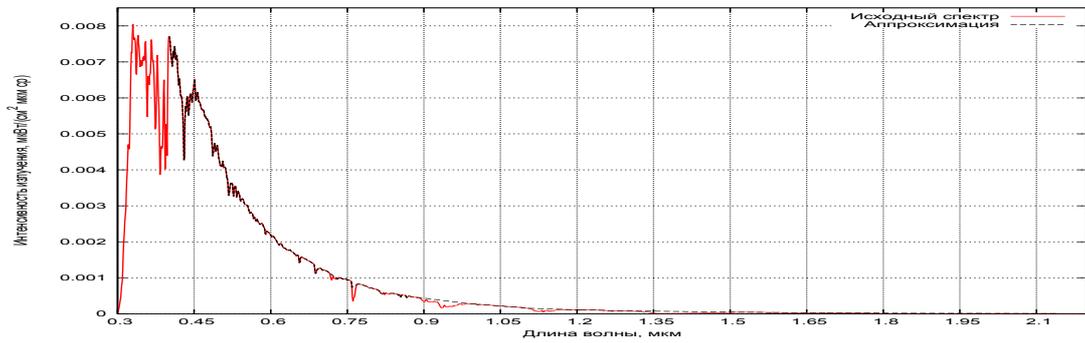
- ФП были разделены на 3 интервала ($0.3-0.6, 0.6-1.2, 1,2-2,4 \text{ мкм}$), которые аппроксимировались полиномами 3, 2, 2 степеней, содержащими 4, 3, 3 коэффициента соответственно, зависящих от четырёх параметров $(\tau, \theta, \beta, \phi)$.
- Аппроксимация проводилась по 2800 узлам ($\tau = 0.05, 0.10, 0.15, 0.20, 0.30, 0.40, 0.50, 0.60, 0.70, 0.80, \theta = 0^\circ \dots 70^\circ$ с шагом $10^\circ, \beta = 0^\circ \dots 60^\circ$ с шагом $10^\circ, \phi = 0^\circ \dots 180^\circ$ с шагом 45°). На рис. 3.21 приведены примеры восстановления спектров $L_{Т0А1}$ и $L_{Т0А0}$ и их относительные ошибки.
- Выполнялась проверка на отсутствие резких выбросов и перегибов на



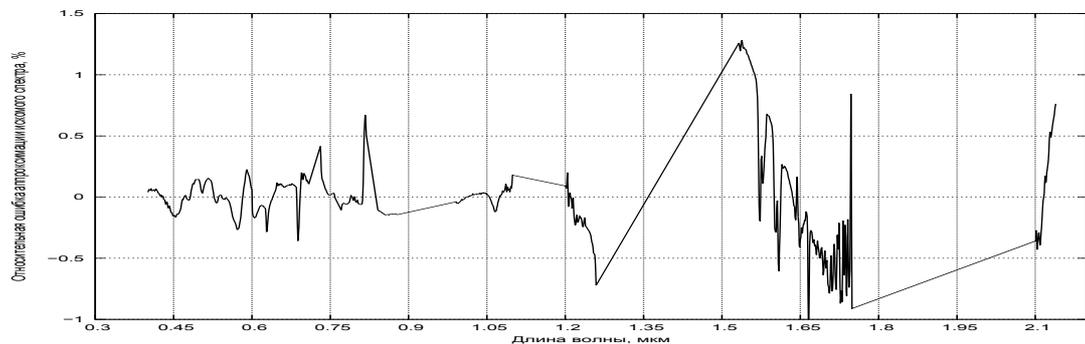
(a) AOT 0.5, СЗУ, ЗУН 0° , OAU 180°



(b) Относительная ошибка восстановления L_{TOA1}



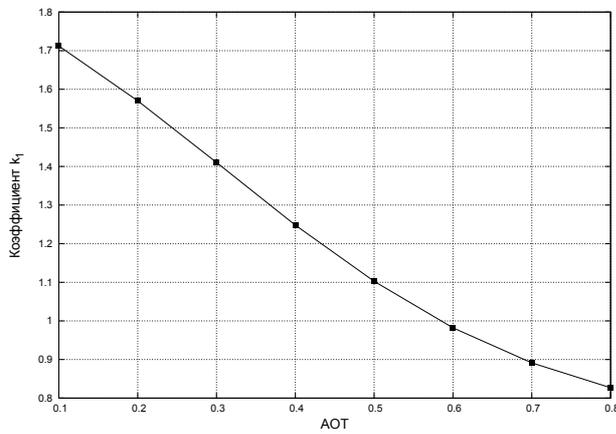
(c) AOT 0.5, СЗУ, ЗУН 0° , OAU 180°



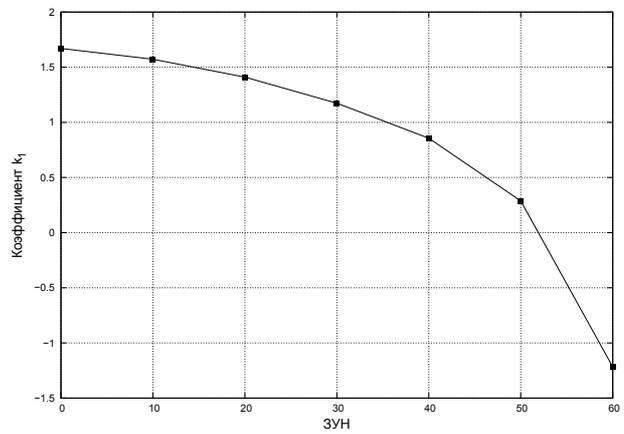
(d) Относительная ошибка восстановления L_{TOA0}

Рис. 3.21. Примеры восстановления L_{TOA1} и L_{TOA0} и их относительные ошибки

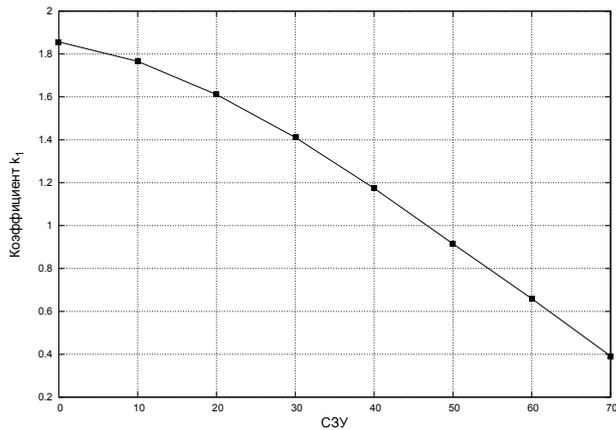
зависимостях коэффициентов полиномов от параметров сопровождения во всех узлах сетки. Такая проверка выполнялась в автоматическом режиме, позволяющем находить на данных зависимостях участки с экстремальными значениями как самих коэффициентов, так и их первых и вторых производных. В качестве примера на рис. 3.22 приведены графики зависимости первого коэффициента полинома первого спектрального участка в различных сечениях пространства параметров в экстремальной точке, соответствующей максимуму второй производной, при $a = 1$.



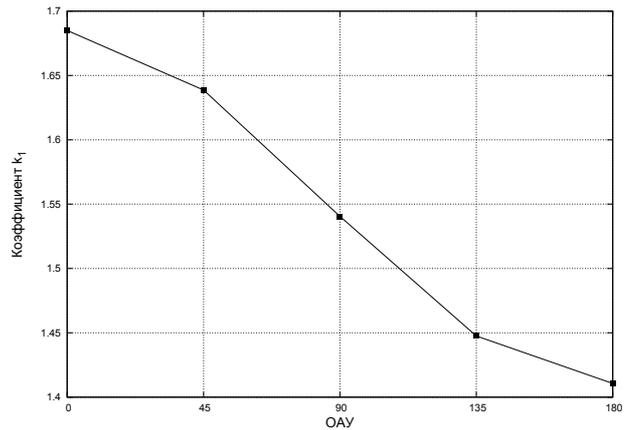
(a) АОТ



(b) ЗУН



(c) СЗУ



(d) ОАУ

Рис. 3.22. Зависимости первого коэффициента полинома в сечении пространства параметров в экстремальной точке при $a = 1$

- Все коэффициенты аппроксимации достаточно точно интерполирова-

лись кубическими сплайнами (относительные ошибки не превышали 1-2%). Так как зависимость искомым спектров от ОАУ минимальна и проявляется лишь при ненулевых значениях обоих углов СЗУ и ЗУН, сначала выполнялась интерполяция значений коэффициентов полиномов в пространстве СЗУ-АОТ-ЗУН для трёх значений ОАУ, в интервалах между которыми находилось заданное значение. А затем, уже по этим трём точкам, путём проведения через них квадратичной параболы, уточнялись значения коэффициентов полинома для заданного значения ОАУ.

3.4.3. Восстановление спектрального альбедо ПП

Спектр интенсивности на ВГА для произвольных значений параметров атмосферы и альбедо ПП определяется в соответствии с выражением

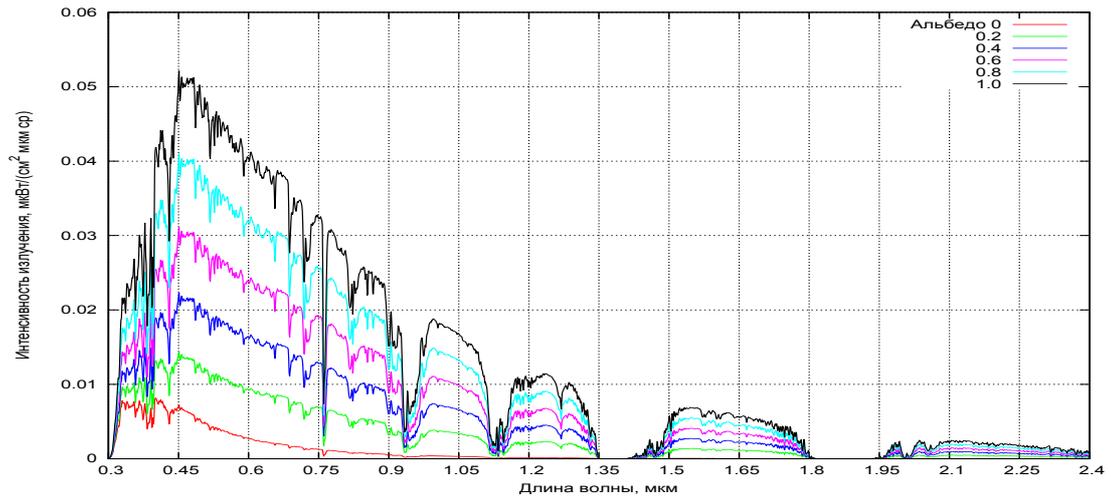
$$L_{ТОА}(a) = L_{ТОА0} + (L_{ТОА1} - L_{ТОА0}) \cdot f_a(a). \quad (3.24)$$

Здесь $f_a(a)$ — функция, зависящая от альбедо и принимающая значения $f_a(1) = 1$ и $f_a(0) = 0$. Для установления характера зависимости $f_a(a)$ был проведён вычислительный эксперимент. С помощью MODTRAN рассчитывалось семейство спектров интенсивности на ВГА при различных сочетаниях параметров атмосферы и углов наблюдения. На рис. 3.23 приведены семейство спектров $L_{ТОА}$ при разных альбедо, зависимость $L_{ТОА}(a)$ на определённой длине волны и корректирующая функция $f_a(a)$.

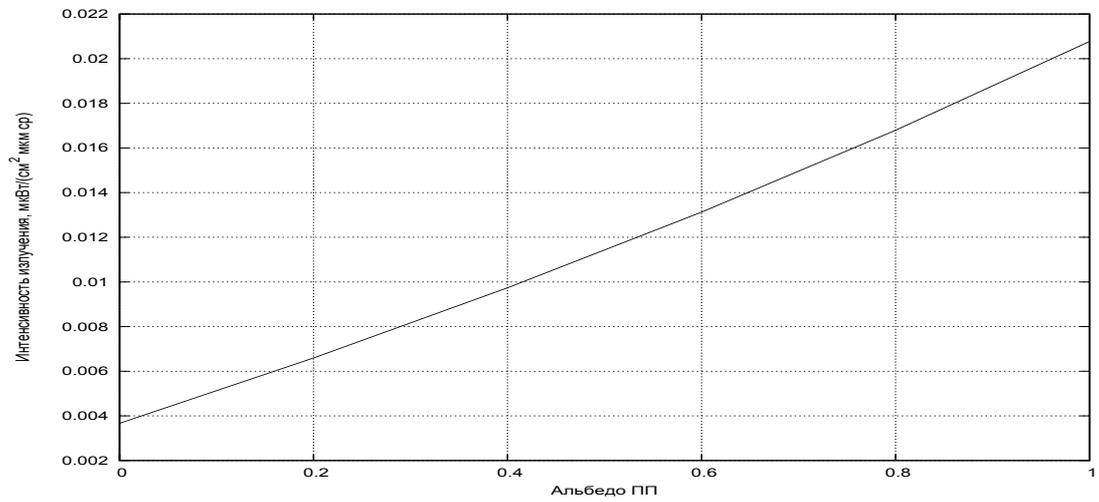
Анализ этих кривых показал, что $f_a(a)$ может быть аппроксимирована линейной функцией, однако погрешности восстановления искомым спектров по каналам при этом могут достигать от 4 до 15%. Для коррекции полученной нелинейности было решено аппроксимировать $f_a(a)$ квадратичным полиномом по аналогии с 3.3.3.

$$f_a(a) = b_2 a^2 + b_1 a. \quad (3.25)$$

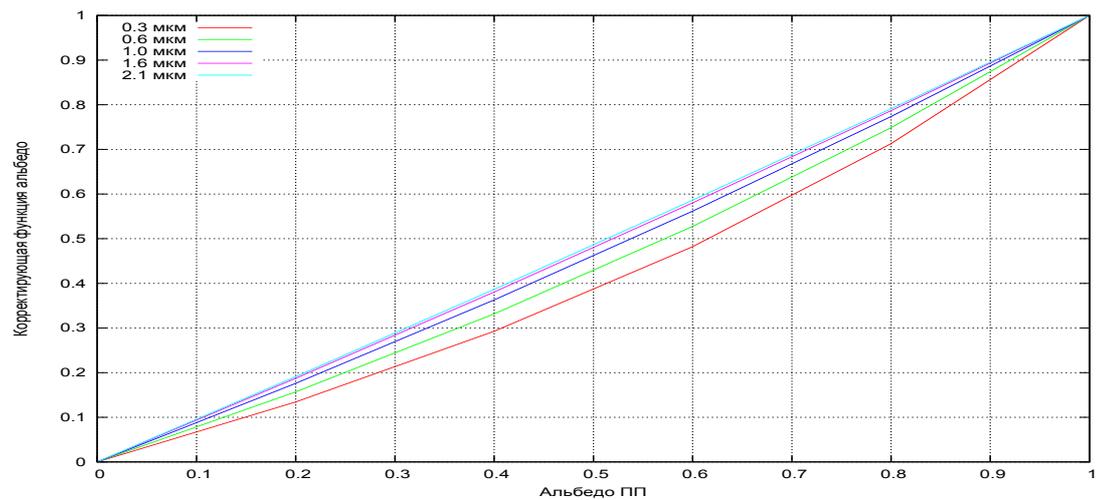
Здесь $b_1 = 1 - b_2$. В свою очередь коэффициент b_2 зависит от λ и гораздо слабее от АОТ и углов. Зависимости $b_2(\lambda)$ хорошо аппроксимируется



(a) Спектры интенсивности излучения на ВГА при разных значениях альbedo ПП



(b) Зависимости интенсивности излучения от альbedo на длине волны 550 нм



(c) Корректирующая функция

Рис. 3.23. Влияние альbedo ПП на интенсивность восходящего излучения

функцией (рис. 3.24 (а))

$$b_2(\lambda) = c_1 \exp(\lambda - \lambda_0)c_2. \quad (3.26)$$

Коэффициент $c_1 \approx 0.45$ и практически не зависит от углов и АОТ. Коэффициент c_2 зависит от АОТ и может быть аппроксимирован квадратичной параболой (рис. 3.24 (b)):

$$c_2 = 5.9407\tau^2 - 11.223\tau + 7.7763 \quad (3.27)$$

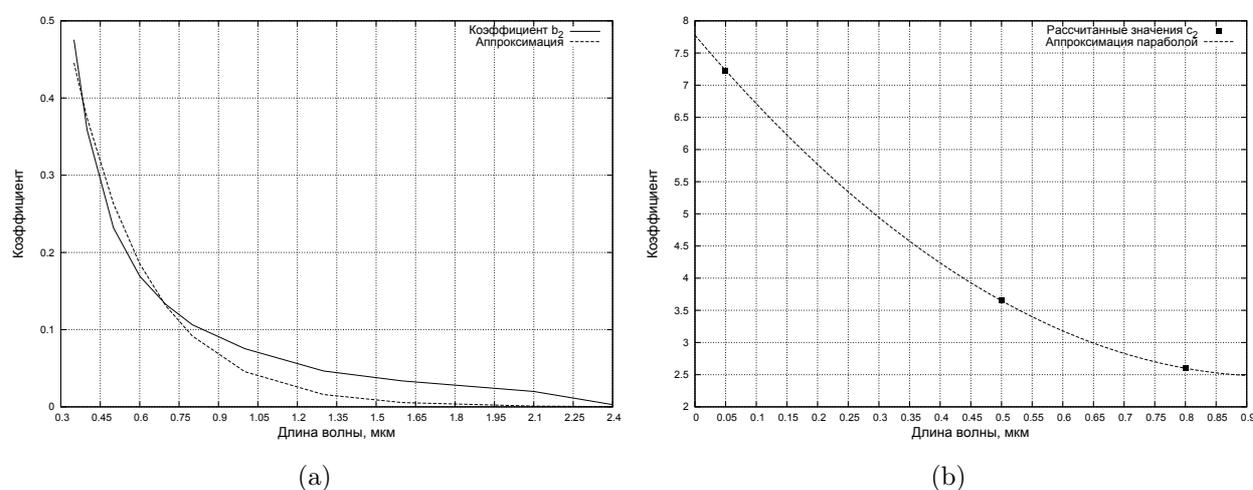


Рис. 3.24. Аппроксимация коэффициентов $b_2(\lambda)$ (а) и $c_2(\tau)$ (b)

Ошибки при использовании таких приближений не превышают 4%.

Расчёт интенсивности в каналах с учётом функции чувствительности производится в соответствии с выражением:

$$L_i = \int_{\lambda_{1,i}}^{\lambda_{2,i}} L_{TOA} \cdot \frac{f_{s_i}(\lambda)d\lambda}{\omega_i}. \quad (3.28)$$

Здесь $\omega_i = \int_{\lambda_{1,i}}^{\lambda_{2,i}} f_{s_i}(\lambda)d\lambda$ — весовая функция, $f_{s_i}(\lambda)$ — функция чувствительности в канале i , $\lambda_{1,i}$, $\lambda_{2,i}$ — границы канала i .

По рассчитанным значениям L_i и измеренным L_{MODi} минимизируется их невязка путём коррекции альбеда. Количество итераций обычно не превышало 6 для каждого канала. Значение альбеда, при котором L_i и L_{MODi}

совпадают, является актуальным для данного канала. По актуальным значениям производится восстановление спектрального альбедо посредством интерполяции.

Выводы

1. Разработан метод оперативного контроля поглощённой ПП энергии на обширных территориях с использованием опорных спектров.
2. Представлена методика аппроксимаций функций преобразования, необходимых для восстановления искомым спектральных зависимостей на основе опорных спектров.
3. Найдены аналитические выражения для функций преобразования всех искомым спектров.
4. Рассчитаны коэффициенты аппроксимации с пошаговым контролем ошибок на всех этапах вычислений.
5. Представлена методика восстановления спектрального альбедо.

Основные результаты главы опубликованы в работах [36, 40–42, 51].

Глава 4

ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДА ОПЕРАТИВНОГО КОНТРОЛЯ ПОГЛОЩЁННОЙ ПП ЭНЕРГИИ

4.1. Программный комплекс для аппроксимации функций преобразования и восстановления искомых спектров

Для аппроксимаций ФП и восстановления искомых спектров был разработан программный комплекс, представляющий собой набор модулей, реализованных с помощью пакета прикладных математических программ Scilab.

В соответствии с предложенной методикой последовательность нахождения ФП и критериев точности аппроксимации состоит из следующих этапов.

Подготовительный этап. На данном этапе с помощью программного комплекса MODTRAN для каждого набора параметров p выполняется расчёт исходных данных в виде текстовых файлов (“.tp7”, “.flx” и “.7sc”). Эти файлы представляют собой числовые массивы, первый столбец которых содержит значение длины волны, а остальные — функции пропускания падающего излучения (“.tp7”), потока (“.flx”) или интенсивности излучения (“.7sc”). Количество строк в этих массивах соответствует исследуемому диапазону длин волн (300-2400 нм) с шагом 1 нм. Как показали проведённые

исследования, для решения поставленных задач достаточно использовать диапазон изменения СЗУ от 0° до 70° , АОТ — от 0.05 до 0.8, а полное содержание водяного пара в столбе атмосферы брать фиксированным и равным 1.3 г/см^2 . Альbedo, ЗУН и ОАУ должны изменяться во всем диапазоне возможных значений от 0 до 1, от 0° до 60° и от 0° до 180° , соответственно. Шаг разбиения сетки пространства параметров по АОТ достаточно брать равным 0.05, по альbedo — 0.2, по ЗУН и СЗУ 10° , и по ОАУ 15° . Таким образом, всего необходимо провести 118272 численных эксперимента. Поскольку расчёты интенсивности восходящего излучения выполнялись только для нулевого и единичного альbedo, функции пропускания вычислялись для одного набора параметров, соответствующего выбранному опорному спектру, а ОАУ и ЗУН не влияли на данные “.flx”, фактическое количество файлов оказалось меньше. Всего в работе было получено 768 файлов второго типа и 12544 файлов третьего типа [117].

Дополнительно необходимо использовать файл “.flt”, содержащий информацию о нормированных на единицу значениях функции чувствительности каналов спектрорадиометра. Для MODIS такие функции приводятся для каждого канала.

Расчёт файлов “.flx” и “.7sc” занимает самое продолжительное время (до нескольких суток при использовании обычного персонального компьютера). Однако, такой расчёт носит однократный характер и может впоследствии потребоваться лишь при появлении более точных моделей в новых версиях MODTRAN, либо же при исследовании территорий с существенно отличными свойствами атмосферы.

На заключительной стадии подготовительного этапа из полученных в процессе численного моделирования файлов удаляются данные, содержащие избыточную или не используемую в дальнейшем информацию. Для файлов “.tr7” вычислялся спектр функции пропускания атмосферы путём перемножения спектров её отдельных компонент (кроме водяного пара и

АОТ), а в файле “.flt” выполнялась интерполяция значений функций чувствительности с целью их перевода на шаг в 1 нм и проводилось усреднение значений этих функций по набору сенсоров каждого из каналов. Все файлы “.flx” и “.7sc” именовались после конвертации так, чтобы их имя отражало значения параметров атмосферы, альbedo ПП и условий наблюдения, и размещались в отдельных каталогах. В работе для этого использовался формат wN.F-aN.F-sI-tN.FF для файлов “.flx” и wN.F-aN.F-sI-tN.FF-vNNN-rNNN для файлов “.7sc”, где N означает один десятичный разряд целой части значения параметра, F — один разряд десятичной дроби в значении параметра, I — целое одноразрядное или двухразрядное значение параметра. Символы перед числами означают: w — полное содержание водяного пара, a — альbedo, s — СЗУ, t — АОТ, v — ЗУН и r — ОАУ.

Выбор опорного спектра и ФП. Необходимость в данном этапе может возникнуть лишь в исключительных случаях, когда при расширении границ диапазона изменения параметров сопровождения может потребоваться изменить методику аппроксимации, ввести дополнительный опорный спектр для повышения точности вычислений или перейти на другой спектральный диапазон.

Предназначенный для этого программный модуль позволяет выбирать до четырёх произвольных спектров из имеющегося набора файлов “.flx” и “.7sc”, выполнять с ними вычисления с целью подбора ФП и представлять полученный результат в наглядном графическом виде. На рис. 4.1 показана экранная форма этого модуля, где в качестве примера приведён процесс подбора ФП для восстановления падающего рассеянного излучения при нулевом альbedo путём представления ФП в виде логарифма отношения спектров.

Заложенные в данный модуль функции позволяют маскировать результат вычислений, редактировать границы и число масок, а для семейства функций, полученных при различных значениях параметра атмосферы,

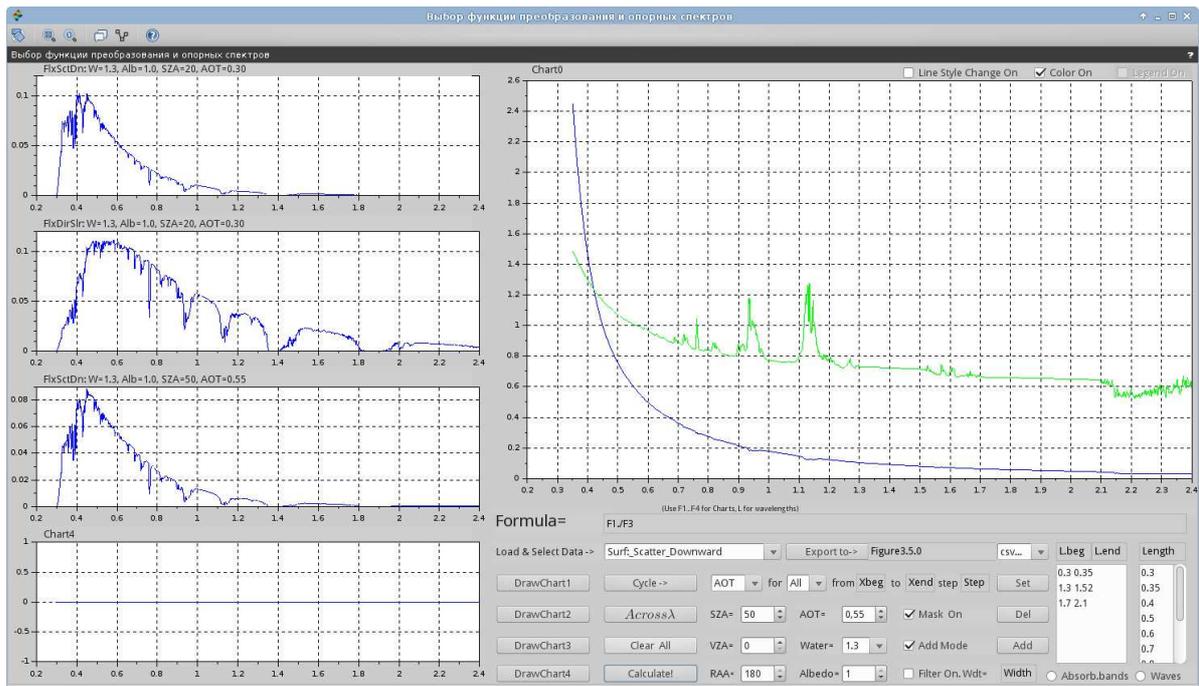


Рис. 4.1. Интерфейс программного модуля для выбора функции преобразования

строить семейство функциональных зависимостей от этого параметра на фиксированных срезах длин волн (функция $Across\ \lambda$). Количество и значения таких срезов можно редактировать. Также имеется возможность фильтровать результат вычислений окном заданной ширины и автоматически для заданного выражения строить семейство зависимостей по произвольно выбранному параметру сопровождения, шаг по которому и границы изменения можно задавать интерактивно (функция $Cycle$). Полученные в выходном окне результаты расчётов можно экспортировать в .csv или текстовый файлы, а также в графические файлы различных форматов. Поскольку .csv-файл содержит только числовые данные, наряду с ним формируется одноимённый текстовый файл со вспомогательной информацией для каждой из отображённых на результирующем графике зависимостей в виде использованной для её построения расчётной формулы и значений параметров сопровождения. Это позволяет при необходимости легко воспроизвести полученный результат.

Выбор вида аппроксимирующей функции, границ и числа участков аппроксимации. Этот этап выполняется в полуавтоматическом режиме с помощью двух программных модулей. Первый из них позволяет подбирать для выбранной на предыдущем этапе ФП аппроксимирующую функцию в виде экспоненциальной зависимости или полинома в фиксированной точке пространства P , соответствующей одному из узлов наложенной на него сетки. При этом можно разбить весь спектральный диапазон на произвольное число отдельных участков (поддиапазонов) с интерактивно задаваемыми границами, и, в случае использования полинома в качестве аппроксимирующей функции, также интерактивно задавать отдельно для каждого из участков его степень. После выполнения аппроксимации на графиках диалогового окна программного модуля отображается исходная и аппроксимированная ФП, виды спектральных зависимостей ошибок аппроксимации, а также получаемый с помощью ФП результирующий спектр в его исходном виде и полученный с применением аппроксимированной ФП. На последнем графике диалогового окна в четвёртом квадранте выводятся зависимости ошибок восстановления искомого спектра от длины волны с применением различных критериев. Данный модуль позволяет выявить наиболее уязвимые участки спектрального диапазона, правильно подобрать маску, участки и степени полиномов для повышения точности восстановления спектра. В качестве примера на рисунке 4.2 показан интерфейс программного модуля для выбора аппроксимирующей функции интенсивности восходящего излучения при нулевом альбедо.

Процесс аппроксимации ФП, расчёт всех коэффициентов для каждого из узлов наложенной на пространство параметров P сетки, а также расчёт коэффициентов кросс-аппроксимации выполняется с помощью второго программного модуля. Помимо расчёта значений коэффициентов аппроксимации в его функцию также входит расчёт и отображение интегральных критериев оценки точности аппроксимации. Это необходимо в силу того,

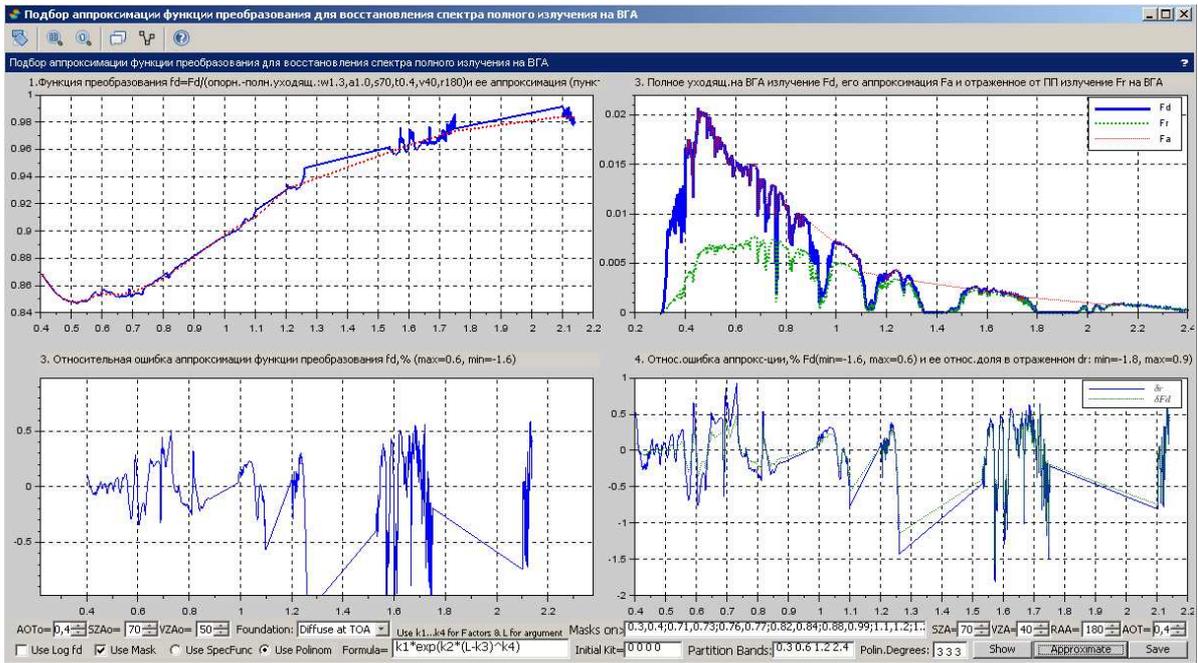


Рис. 4.2. Интерфейс программного модуля для выбора аппроксимирующей функции интенсивности восходящего излучения при нулевом альбедо

что первый из пары программных модулей позволяет оценить точность аппроксимации лишь в одной из конкретных точек пространства параметров P отдельно для каждой длины волны. После успешного завершения работы второго программного модуля (полученные интегральные критерии аппроксимации являются приемлемыми), результаты аппроксимации записываются в выходные .csv-файлы. Один из них содержит коэффициенты аппроксимации ФП для всех узлов накладываемой на пространство параметров P сетки и для всех участков спектрального диапазона. Во второй файл записываются интегральные критерии точности аппроксимации по всему диапазону с целью их дальнейшего анализа и экспорта в другие приложения. В третий файл записываются коэффициенты кросс-аппроксимации ФП. Данный файл отсутствует при аппроксимации восходящего излучения, так как его восстановление выполняется путём четырёхмерной интерполяции.

Поскольку для восстановления искомых спектров последовательность аппроксимации ФП несколько различна, в программном комплексе было

разработано для них три пары вышеописанных модулей:

- аппроксимация падающего рассеянного излучения при нулевом альбедо;
- аппроксимация падающего рассеянного излучения при ненулевом альбедо;
- аппроксимация интенсивности восходящего излучения при нулевом и единичном альбедо ПП;

На рисунке 4.3 приведён вид интерфейса программного модуля итоговой аппроксимации коэффициентов полиномов для восстановления интенсивности восходящего излучения при нулевом альбедо и показаны зависимости этих коэффициентов при фиксированных значениях других параметров в точке, соответствующей максимальной относительной ошибке.

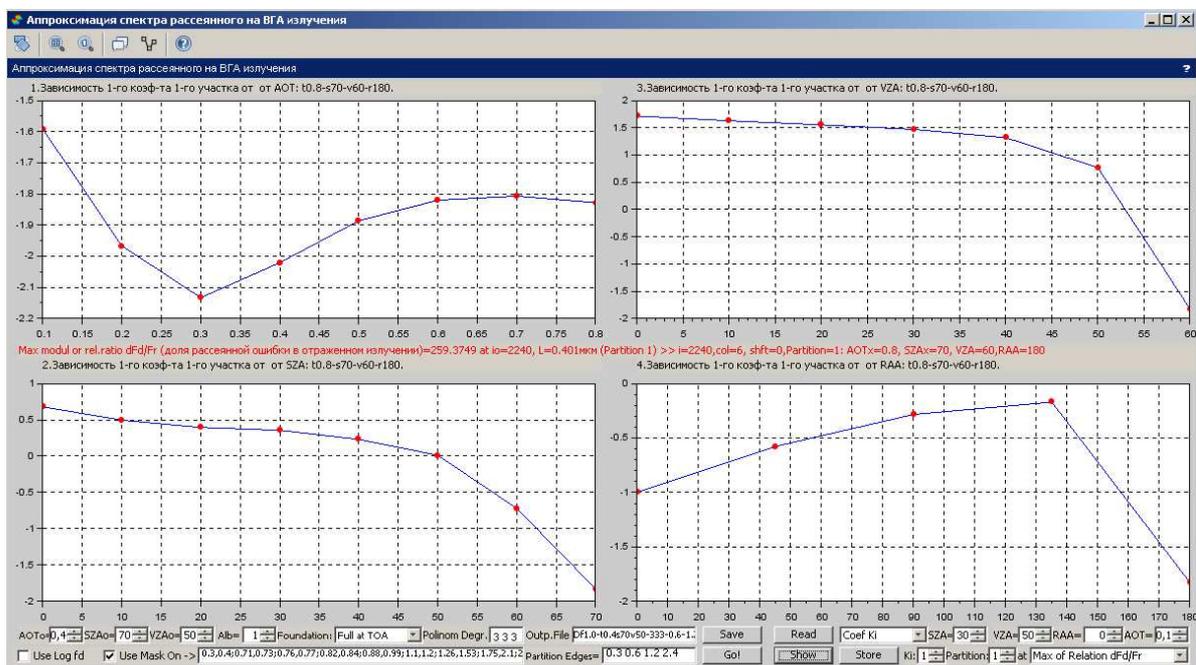


Рис. 4.3. Пример интерфейса программного модуля итоговой аппроксимации 1 коэффициента полинома для восстановления интенсивности восходящего излучения

4.2. Программный модуль для практической реализации метода оперативного контроля поглощенной ПП энергии

Данный модуль представляет собой пакет, содержащий две основные функции, одна из которых выполняет процедуру инициализации, а вторая производит требуемые вычисления. Процедура инициализации заключается в считывании информации из .csv-файлов и вспомогательных текстовых конфигурационных файлов и присвоении значений соответствующим глобальным переменным, необходимым для выполнения вычислений второй функцией. Входные данные для процедуры инициализации берутся из следующих файлов.

1. Файл, содержащий опорные спектры функций пропускания для водяного пара, аэрозоля и атмосферы, спектр солнечной постоянной, а также соответствующий конфигурационный файл со значениями содержания водяного пара, АОТ и СЗУ, для которых были вычислены функции пропускания.
2. Файл, содержащий массив коэффициентов аппроксимации $f_0(\lambda, p)$ для восстановления падающего рассеянного излучения с нулевым альбедо на всех участках спектрального диапазона, и соответствующий ему конфигурационный файл, с информацией о границах участков аппроксимации и степенями аппроксимирующих полиномов.
3. Файл, содержащий массив коэффициентов аппроксимации функций $f_1(\lambda, p)$ и $f_a(a)$ для восстановления потока падающего рассеянного излучения при произвольном значении альбедо и соответствующий ему конфигурационный файл, содержащий для каждого из участков информацию об их границах и степени использованной на нем степени полинома.
4. Файл, содержащий опорные спектры восходящего излучения при нулевом и единичном альбедо.

5. Файл, содержащий массив коэффициентов аппроксимации ФП для восстановления интенсивности восходящего излучения при нулевом альбедо и соответствующий ему конфигурационный файл, содержащий для каждого из участков информацию об их границах и степени использованной на нем степени полинома.
6. Файл, содержащий массив коэффициентов аппроксимации ФП для восстановления интенсивности восходящего излучения при единичном альбедо и соответствующий ему конфигурационный файл, содержащий для каждого из участков информацию об их границах и степени использованной на нем степени полинома.
7. Файл с нормированными на единицу усреднёнными функциями чувствительности 20 каналов спектрорадиометра MODIS, расположенных в диапазоне 0.3-2.4 мкм и соответствующий конфигурационный файл с масштабирующими коэффициентами для расчёта откликов в этих каналах. При переходе на другую спутниковую платформу достаточно заменить только этот файл.

Алгоритм работы второй функции программного модуля восстановления поглощённой ПП энергии приведён на рис. 4.4 и 4.5. На первом этапе (рис. 4.4) выполняется итерационная процедура восстановления спектрального альбедо. Входными параметрами являются значения АОТ, ЗУН, СЗА, ОАУ, полное содержание водяного пара и отклики каналов спектрорадиометра, которые, в зависимости от структуры основной программы, могут вводиться в интерактивном режиме в диалоговом окне, либо же находиться в отдельном файле. Часть повторяющихся вычислительных операций, связанных с нахождением альбедо, вынесена из тела итерационного цикла. К ним относятся операции по нахождению коэффициентов c_1 и c_2 , используемых для расчёта $b_2(\lambda)$ корректирующей функции $f_a(a, \lambda)$ (см. раздел 3.3.3). Процесс поиска значений альбедо во всех каналах осуществляется одновременно, что позволяет дополнительно оптимизировать вычислительный

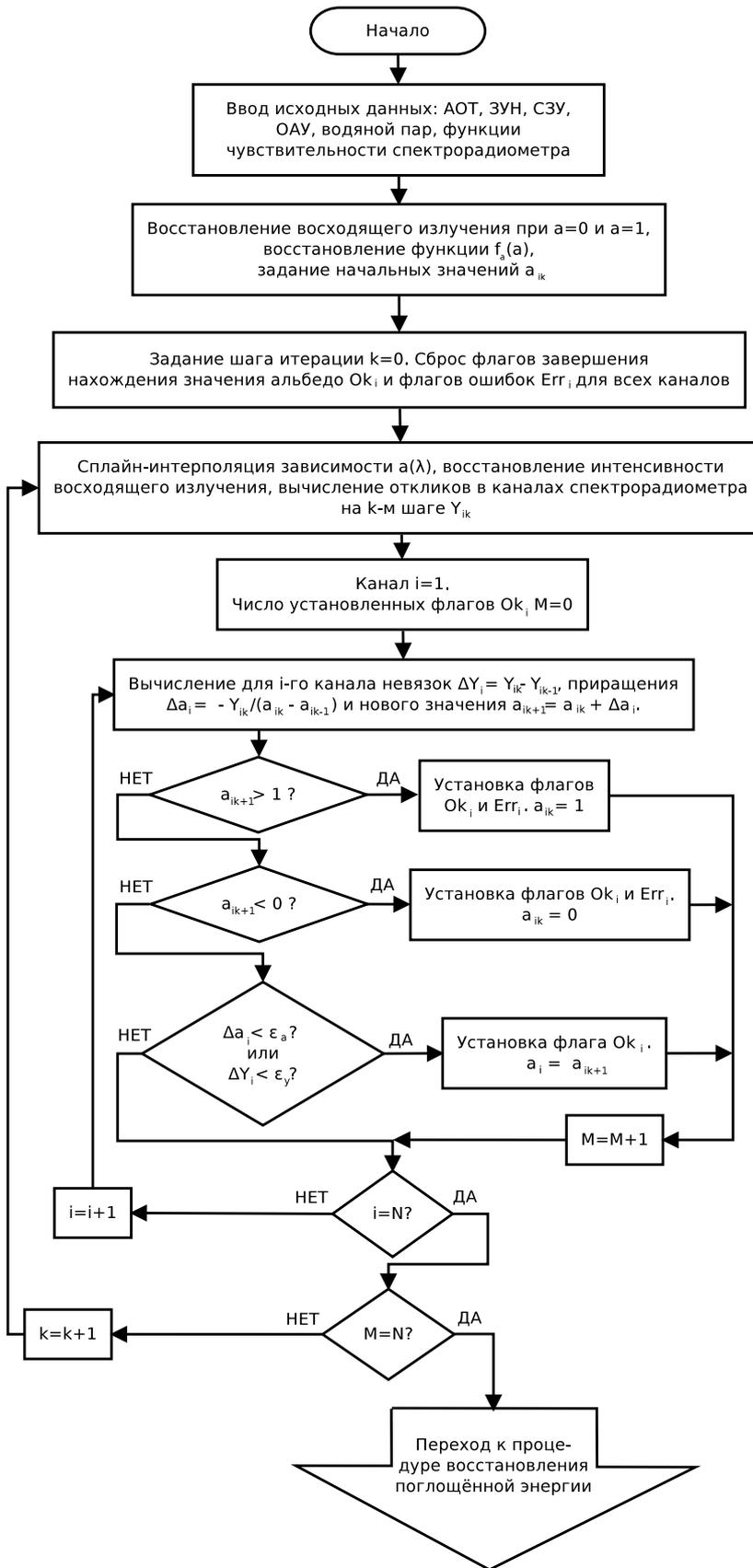


Рис. 4.4. Алгоритм восстановления спектрального альbedo



Рис. 4.5. Алгоритм восстановления количества поглощённой энергии

процесс. Поскольку зависимость $a(\lambda)$ аппроксимируется на каждом шаге текущей итерации, это позволяет более точно восстанавливать спектр восходящего излучения.

На втором этапе (рис. 4.5) выполняется восстановление падающего на ПП потока излучения и расчёт количества поглощённой ПП энергии.

Для тестирования и последующей верификации данный пакет интегрировался в отладочную программу, позволяющую контролировать процесс расчёта на различных стадиях выполнения алгоритма путём сравнения получаемых результатов с модельными данными, рассчитанными с использованием MODTRAN. На рисунке 4.6 приведён пример работы разработанного программного модуля, осуществляющего восстановление альбеда ПП и расчёт количества поглощённой энергии. На экранной форме показаны восстановленные спектры восходящего излучения на ВГА, значения откликов в каналах спектрорадиометра, спектры альбеда поверхности и спектры

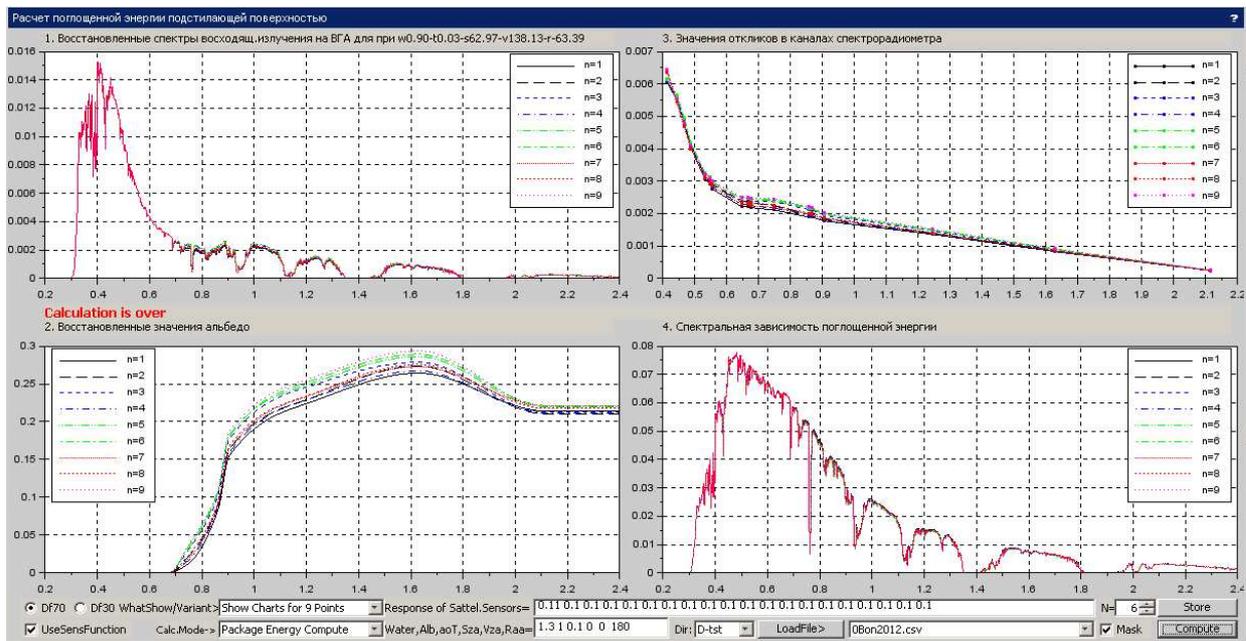


Рис. 4.6. Пример работы программного модуля восстановления альbedo и поглощённой энергии

поглощённой энергии.

Переключение режима ввода данных (из поля ввода на оконной форме или из файла) и выбор режима тестирования задаётся соответствующим пунктом раскрывающегося списка «Calc.Mode». Раскрывающийся список «Show/Variant» позволяет задавать тип отображаемых данных.

4.3. Верификация и практическое применение разработанного метода

Верификация метода оперативного контроля поглощённой ПП энергии на основе опорных спектров проводилась на том же наборе данных SURF-RAD, что и в главе 2. Результаты, приведённые в аналогичной таблице 4.1, показали, что среднеквадратичное отклонение лежит в пределах 31–41 Вт/м² при относительной погрешности не выше 4.38%. Таким образом, этот метод не уступает по точности методу восстановлению поглощённой энергии с использованием MODTRAN.

В работе [26] было показано, что использование осреднённых по пло-

Таблица 4.1

Результаты верификации гибридной модели

Bondville				Boulder				Desert Rock			
Расчёт	Станция	Разн.	%	Расчёт	Станция	Разн.	%	Расчёт	Станция	Разн.	%
793.3	779.8	13.5	1.73	683.0	686.9	-3.9	-0.57	720.7	719.0	1.7	0.24
819.2	851.6	-32.4	-3.80	758.2	741.5	16.7	2.25	802.9	831.8	-28.9	-3.47
739.7	762.7	-23	-3.02	804.6	778.8	25.8	3.31	864.5	828.6	35.9	4.33
745.3	760.7	-15.4	-2.02	545.9	549.5	-3.6	-0.66	791.4	750.5	40.9	5.45
774.7	793.8	-19.1	-2.41	779.2	819.9	-40.7	-4.96	711.8	757.5	-45.7	-6.03
827.6	787.9	39.7	5.04	815.6	870.3	-54.7	-6.29	774.5	770.9	3.6	0.47
750.2	721.4	28.8	3.99	840.7	836.7	4	0.48	734.0	800.3	-66.3	-8.28
866.0	793.4	72.6	9.15	757.5	777.0	-19.5	-2.51	758.0	778.8	-20.8	-2.67
758.8	749.1	9.7	1.29	816.8	824.0	-7.2	-0.87	734.9	741.1	-6.2	-0.84
812.2	811.3	0.9	0.11	779.2	832.4	-53.2	-6.39	660.6	725.4	-64.8	-8.93
839.2	830.4	8.8	1.06	778.8	753.5	25.3	3.36	718.4	739.9	-21.5	-2.91
677.7	713.9	-36.2	-5.07	835.8	841.3	-5.5	-0.65	543.6	512.2	31.4	6.13
744.2	716.3	27.9	3.90	780.7	829.4	-48.7	-5.87	583.6	598.3	-14.7	-2.46
803.4	825.2	-21.8	-2.64	389.8	477.7	-87.9	-18.40	589.0	577.6	11.4	1.97
797.2	767.9	29.3	3.82	729.8	770.5	-40.7	-5.28	554.8	555.2	-0.4	-0.07
783.9	794.1	-10.2	-1.28	787.7	835.6	-47.9	-5.73	700.4	755.8	-55.4	-7.33
777.9	838.7	-60.8	-7.25	811.3	822.3	-11	-1.34	684.1	609.1	75	12.31
710.7	734.9	-24.2	-3.29	709.0	761.6	-52.6	-6.91	746.6	756.4	-9.8	-1.30
721.3	740.0	-18.7	-2.53	788.5	796.5	-8	-1.00	693.8	614.0	79.8	13.00
809.9	791.4	18.5	2.34	789.2	808.7	-19.5	-2.41	716.2	713.4	2.8	0.39
706.1	745.1	-39	-5.23	805.2	857.1	-51.9	-6.06	844.9	837.7	7.2	0.86
722.0	696.9	25.1	3.60	774.2	773.5	0.7	0.09	715.8	666.7	49.1	7.36
658.3	683.9	-25.6	-3.74	752.8	762.3	-9.5	-1.25	808.3	881.1	-72.8	-8.26
603.7	633.4	-29.7	-4.69	739.3	750.7	-11.4	-1.52	857.3	868.8	-11.5	-1.32
631.0	650.7	-19.7	-3.03	702.4	713.6	-11.2	-1.57	730.0	707.2	22.8	3.22
Среднее:		26.0	3.44	Среднее:		26.4	3.59	Среднее:		31.2	4.38
СКО: 30.81				СКО: 35.35				СКО: 41.00			

площади 9 км² данных (9 пикселей MODIS) о поглощённой энергии даёт более точные результаты при верификации. Поскольку разработанный программный модуль не использует для расчёта поглощённой ПП энергии MODTRAN и отличается высоким быстродействием, это позволило провести дополнительные эксперименты по оценке его точности. Для более детального анализа были взяты спутниковые данные за 2012-2013 гг., по которым был произведён расчёт поглощённой ПП энергии на площади 9 км² вокруг области станций, однако результат оказался не более чем на 0.5-0.9% точнее расчётов по одной точке.

Дополнительно был проведён интервальный анализ рассчитанных и измеренных значений поглощённой ПП энергии. Для этого сравнивались ин-

тервалы 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. 4.7 приведены результаты верификации с использованием интервального анализа за период 2012-2013 гг. Из этого следует, что разработанный метод позволяет получать достаточно точные результаты при безоблачном небе. Оценка же применимости метода в условиях сплошной облачности требует дополнительных систематических экспериментов.

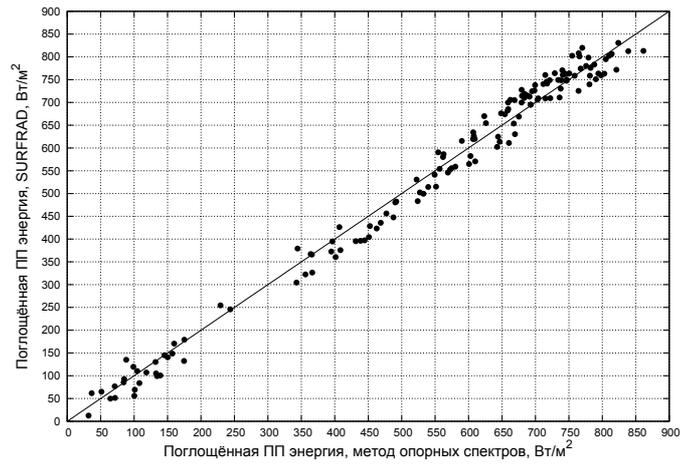
Дополнительно для 75 выбранных спутниковых сцен был проведён расчёт количества поглощённой ПП энергии с использованием метода, предложенного в работе [25]. В таблице 4.2 приведены результаты этого расчёта, которые оказались хуже результатов предложенного метода.

Таблица 4.2

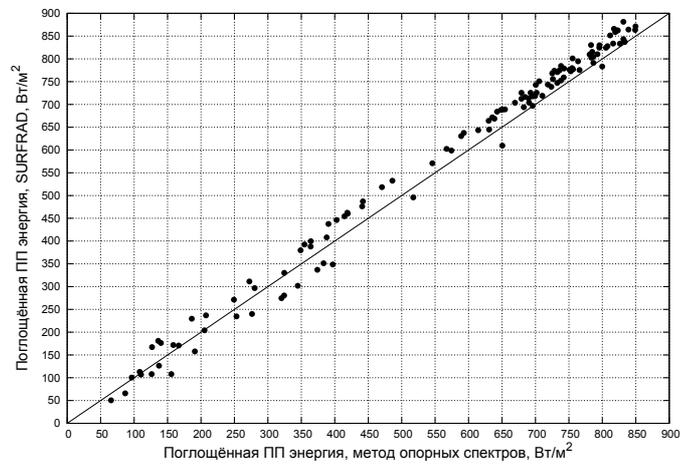
Результаты верификации по модели [25]

Станция	СКО, Вт/м ²	Сред. отн. ошибка
Bondville	89.23	12.67%
Boulder	91.46	13.51%
Desert Rock	94.55	13.89%

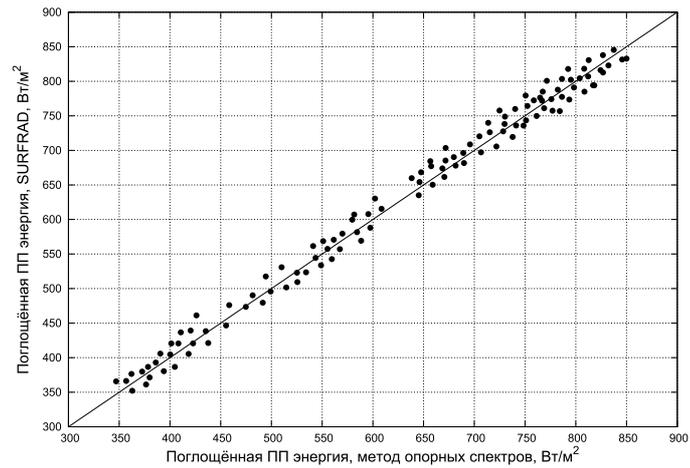
Разработанный программный модуль оперативного контроля поглощённой ПП энергии внедрён в Институте водных и экологических проблем СО РАН (г. Барнаул) для использования в работах по созданию и применению автономного многоканального измерительного комплекса для контроля состояния метеорологических и гидрофизических параметров, относящихся к водному объекту [118, 119]. Сопоставление результатов обработки спутниковых данных, полученных с применением программного модуля,



(a) Станция Bondville



(b) Станция Boulder



(c) Станция Desert Rock

Рис. 4.7. Верификация с наземными станциями по данным 2012-2013 гг.

и зарегистрированных логгером показаний балансомера, размещённого на территории Республики Алтай ($51^{\circ} 40' 51''$ с.ш., $86^{\circ} 13' 49''$ в.д.), за период июнь-октябрь 2015 г. показали, что расхождение в значениях величины поглощённой ПП энергии за весь период не превысили 7-12%.

Другим примером практического применения разработанного программного модуля явилось его внедрение в отделе космического мониторинга и прогнозирования ЧС АлтГУ для контроля поглощённой ПП энергии в реальном времени на территории Западной Сибири [52].

Выводы

1. Представлены разработанные:

- программный комплекс для нахождения коэффициентов аппроксимации функций преобразования, необходимых для восстановления искомого спектров;
- программный модуль для восстановления поглощённой ПП энергии по спутниковым данным на основе опорных спектров;
- интерактивный программный модуль для анализа спектральных зависимостей и выбора опорных спектров.

2. Проведена верификация предложенного метода по наземным станциям и сравнение с другими продуктами. Представлены полученные результаты.

3. Разработанный программный модуль оперативного контроля поглощённой ПП энергии был использован для решения конкретных задач мониторинга окружающей среды в отделе космического мониторинга и прогнозирования ЧС АлтГУ и в Институте водных и экологических проблем СО РАН.

Основные результаты главы опубликованы в работах [48, 52–54, 56]

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Предложен гибридный метод контроля поглощённой ПП энергии по данным спутникового мониторинга на основе спектрального подхода и восстановления спектрального альбеда, реализованный с использованием программного комплекса MODTRAN5.2.1 и опорных спектров.

2. Предложена итерационная методика восстановления спектрального альбеда по данным каналов спутникового прибора в оптическом и ближнем ИК диапазонах. Точность восстановления альбеда оценивалась сопоставлением рассчитанных значений альбеда со значениями альбеда из продукта MODIS MOD43B3, обновляемыми раз в 16 дней. Максимальное отклонение среднего значения от референсного составило 9%, что лежит в пределах временной вариативности альбеда. Сопоставление спектрального интерполированного альбеда с данными базы ASTER показало хорошее совпадение, за исключением полос поглощения.

3. Разработан метод контроля поглощённой ПП энергии на основе спектрального подхода и восстановления спектрального альбеда ПП с использованием MODTRAN5.2.1. Верификация метода была проведена по реальным спутниковым данным с сетью станций наземного мониторинга SURFRAD в США. Использовались три станции в Boulder, Bondville и Desert Rock с данными наблюдения за 2010-2013 гг. Было выполнено и верифицировано 75 расчётов количества поглощённой ПП энергии. Среднеквадратичное отклонение составило 36-44 Вт/м², модуль относительной ошибки не превышает 5.3%.

4. Предложена методика восстановления спектров потоков и интенсивностей излучения на ПП и ВГА на основе спутниковых данных, выбранных

опорных спектров и соответствующих функций преобразования и её программная реализация.

5. Разработан метод оперативного контроля поглощённой ПП энергии на основе опорных спектров и реализующий его программный модуль, быстродействие которого на два порядка выше, чем при использовании MODTRAN5.2.1.

6. Проведена верификация метода оперативного контроля поглощённой ПП энергии с данными наземных станций SURFRAD. Среднеквадратичное отклонение не превысила 41 Вт/м^2 , а относительная ошибка — 4.38%. Сравнение с результатами, полученными в других работах, а также дополнительные эксперименты (интервальный анализ) подтверждают высокую точность предложенного метода.

7. Программная реализация предложенных методик выполнялась с помощью пакета прикладных программ Scilab и языка FORTRAN и включала:

- программный модуль для исследования зависимости спектров излучения от параметров сопровождения и выбора опорных спектров;
- программный комплекс для расчёта коэффициентов аппроксимации функций преобразования;
- программный модуль для оперативного контроля поглощённой ПП энергии на обширных территориях.

8. Программный модуль оперативного контроля поглощённой ПП энергии использован для решения конкретных задач мониторинга окружающей среды в отделе космического мониторинга и прогнозирования ЧС АлтГУ и в Институте водных и экологических проблем СО РАН.

Автор выражает благодарность д.ф.-м.н., проф. Лагутину А.А. за научное руководство и А. Берк за консультации по использованию программного комплекса MODTRAN5.2.1.

Приложение А

Сцены MODIS для верификации

Каждая строка таблицы А.1 соответствует результату, приведённому в таблицах 2.4 и 4.1. Формат данных: "год + день в году.время по UTC".

Таблица А.1

Дата и время для использованных при верификации сцен MODIS

Bondville	Boulder	Desert Rock
2013127.1650	2013111.1830	2013154.1810
2013132.1710	2013124.1800	2013164.1850
2013133.1615	2013152.1825	2013171.1855
2013134.1655	2013155.1715	2013180.1850
2013139.1715	2013160.1735	2013196.1850
2013141.1705	2013163.1805	2013212.1850
2013149.1615	2013170.1810	2013214.1835
2013154.1630	2013171.1715	2013221.1845
2013162.1720	2013172.1800	2013228.1850
2013164.1710	2013174.1745	2013230.1835
2013171.1715	2013176.1735	2013235.1855
2013172.1620	2013177.1815	2013253.1840
2013175.1650	2013179.1805	2013292.1850
2013178.1720	2013186.1810	2013297.1905
2013179.1625	2013192.1735	2013299.1855
2013193.1640	2013200.1825	2013156.1800
2013194.1720	2013202.1810	2012127.1820
2013195.1625	2013203.1715	2012141.1830
2013200.1645	2013204.1800	2012143.1820
2013205.1705	2013211.1805	2012148.1835
2013216.1645	2013214.1835	2012153.1855
2013221.1705	2013227.1805	2012157.1830
2013242.1720	2013232.1825	2012162.1850
2013253.1705	2013239.1830	2012169.1855
2013248.1645	2013250.1810	2012180.1835

Приложение Б

Коэффициенты аппроксимации функции преобразования падающего рассеянного потока излучения

Таблица Б.1

Коэффициенты кросс-аппроксимации падающего рассеянного потока излучения для первого участка ФП

k_i	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7	a_8	a_9
1	-19.75	28.86	0.89	-0.07	-0.05	-30.56	-0.00	0.06	0.00	8.85
2	221.10	-274.69	-6.88	-0.03	0.38	308.63	0.04	-0.64	-0.01	-88.84
3	-869.96	1017.11	21.32	0.66	-1.20	-1127.53	-0.18	2.50	0.02	319.91
4	1407.54	-1561.11	-30.07	-1.19	1.71	1711.69	0.30	-4.22	-0.03	-477.01

Таблица Б.2

Коэффициенты кросс-аппроксимации падающего рассеянного потока излучения для второго участка ФП

k_i	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7	a_8	a_9
1	18.07	-2.48	0.38	-0.30	-0.01	9.52	0.01	0.03	0.00	-2.77
2	-105.65	22.56	-1.89	1.46	0.07	-48.98	-0.04	-0.14	-0.00	12.98
3	209.10	-8.78	3.79	-2.89	-0.15	59.80	0.07	0.26	0.00	-12.45
4	-191.22	-14.86	-3.47	2.65	0.13	-32.43	-0.07	-0.23	-0.00	3.74

Таблица Б.3

Коэффициенты кросс-аппроксимации падающего рассеянного потока излучения для третьего участка ФП

k_i	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7	a_8	a_9
1	0.32	0.29	0.04	-0.04	-0.00	2.97	0.00	0.01	0.00	-1.30
2	-7.74	17.16	-0.06	0.07	0.00	-21.86	-0.00	-0.01	-0.00	7.78
3	5.15	-16.40	0.04	-0.04	-0.00	20.20	0.00	0.00	0.00	-7.16

Таблица Б.4

Коэффициенты аппроксимации падающего рассеянного потока излучения
для первого участка ФП

СЗУ	АОТ	k_1	k_2	k_3	k_4	СЗУ	АОТ	k_1	k_2	k_3	k_4
0	0.05	-17.68	205.85	-819.13	1330.89	40	0.05	-12.64	168.36	-706.04	1176.82
0	0.10	-15.66	186.78	-751.66	1231.82	40	0.10	-11.11	154.58	-658.43	1109.79
0	0.15	-14.02	171.21	-695.02	1146.00	40	0.15	-9.89	143.45	-618.55	1051.16
0	0.20	-12.81	159.71	-652.44	1080.47	40	0.20	-8.98	135.25	-588.38	1005.63
0	0.25	-11.92	151.43	-621.30	1031.97	40	0.25	-8.33	129.59	-567.09	972.91
0	0.30	-11.28	145.56	-598.84	996.59	40	0.30	-7.89	125.94	-553.02	950.96
0	0.35	-10.82	141.58	-583.33	971.88	40	0.35	-7.60	123.89	-544.77	937.90
0	0.40	-10.50	138.94	-572.74	954.83	40	0.40	-7.43	123.07	-541.11	931.94
0	0.45	-10.28	137.35	-566.08	943.86	40	0.45	-7.35	123.18	-540.92	931.36
0	0.50	-10.14	136.61	-562.59	937.84	40	0.50	-7.35	124.02	-543.54	935.19
0	0.55	-10.07	136.53	-561.60	935.76	40	0.55	-7.39	125.45	-548.36	942.50
0	0.60	-10.05	137.01	-562.73	937.03	40	0.60	-7.49	127.37	-555.11	952.88
0	0.65	-10.07	137.93	-565.52	951.93	40	0.65	-7.62	129.70	-563.41	965.71
0	0.70	-10.13	139.21	-569.72	947.07	40	0.70	-7.78	132.34	-572.95	980.55
0	0.75	-10.22	140.82	-575.18	955.23	40	0.75	-7.97	135.28	-583.66	997.26
0	0.80	-10.33	142.69	-581.62	964.97	40	0.80	-8.18	138.48	-595.39	1015.60
10	0.05	-17.48	204.43	-814.99	1325.44	50	0.05	-7.01	123.92	-567.56	982.88
10	0.10	-15.49	185.75	-748.97	1228.67	50	0.10	-5.76	113.10	-530.84	932.97
10	0.15	-13.87	170.38	-693.08	1144.09	50	0.15	-4.80	104.84	-501.85	891.93
10	0.20	-12.67	158.98	-650.93	1079.29	50	0.20	-4.11	99.06	-480.93	861.45
10	0.25	-11.78	150.72	-619.88	1030.94	50	0.25	-3.63	95.39	-467.35	841.34
10	0.30	-11.17	145.19	-598.64	997.45	50	0.30	-3.33	93.42	-459.83	830.12
10	0.35	-10.72	141.23	-583.18	972.86	50	0.35	-3.16	92.91	-457.59	826.92
10	0.40	-10.40	138.70	-573.05	956.52	50	0.40	-3.11	93.54	-459.62	830.26
10	0.45	-10.19	137.20	-566.70	946.04	50	0.45	-3.13	94.97	-464.68	838.31
10	0.50	-10.06	136.54	-563.51	940.51	50	0.50	-3.22	97.04	-472.19	850.18
10	0.55	-9.99	136.54	-562.83	938.92	50	0.55	-3.35	99.63	-481.67	865.18
10	0.60	-9.98	137.10	-564.25	940.65	50	0.60	-3.52	102.66	-492.88	882.92
10	0.65	-10.01	138.08	-567.30	944.97	50	0.65	-3.72	106.05	-505.51	902.94
10	0.70	-10.07	139.42	-571.72	951.49	50	0.70	-3.95	109.73	-519.29	924.78
10	0.75	-10.17	141.10	-577.44	960.05	50	0.75	-4.21	113.70	-534.18	948.42
10	0.80	-10.28	143.03	-584.17	970.25	50	0.80	-4.49	117.89	-549.96	973.48
20	0.05	-16.81	199.67	-801.04	1306.91	60	0.05	6.35	14.10	-217.18	482.54
20	0.10	-14.90	181.91	-738.49	1215.80	60	0.10	7.00	9.79	-205.26	472.86
20	0.15	-13.36	167.28	-685.44	1135.84	60	0.15	7.53	6.38	-194.87	462.12
20	0.20	-12.20	156.45	-645.38	1074.37	60	0.20	7.92	4.16	-187.88	454.47
20	0.25	-11.37	148.73	-616.30	1029.15	60	0.25	8.18	3.27	-185.32	452.57
20	0.30	-10.77	143.32	-595.57	996.52	60	0.30	8.32	3.60	-187.15	456.94
20	0.35	-10.35	139.75	-581.56	974.21	60	0.35	8.34	5.18	-193.51	468.09
20	0.40	-10.06	137.48	-572.38	959.38	60	0.40	8.26	7.82	-203.81	485.25
20	0.45	-9.87	136.26	-567.11	950.62	60	0.45	8.13	10.91	-215.88	505.17
20	0.50	-9.76	135.85	-564.87	946.61	60	0.50	7.94	14.73	-230.68	529.31
20	0.55	-9.71	136.09	-565.10	946.49	60	0.55	7.73	18.85	-246.73	555.44
20	0.60	-9.72	136.87	-567.38	949.60	60	0.60	7.47	23.42	-264.48	584.21
20	0.65	-9.77	138.10	-571.37	955.42	60	0.65	7.23	27.91	-282.09	612.82
20	0.70	-9.85	139.66	-576.66	963.33	60	0.70	6.87	33.50	-303.69	647.65
20	0.75	-9.96	141.56	-583.24	973.31	60	0.75	6.50	39.33	-326.21	683.91
20	0.80	-10.09	143.72	-590.83	984.90	60	0.80	6.15	44.98	-348.19	719.38
30	0.05	-15.45	189.83	-771.87	1267.78	70	0.05	49.33	-353.42	981.30	-1258.46
30	0.10	-13.69	173.64	-715.27	1186.34	70	0.10	49.88	-355.38	982.99	-1251.45
30	0.15	-12.26	160.28	-667.02	1114.20	70	0.15	50.12	-354.13	973.41	-1228.00
30	0.20	-11.20	150.41	-630.57	1058.55	70	0.20	50.22	-351.60	959.86	-1200.12
30	0.25	-10.44	143.46	-604.37	1017.92	70	0.25	50.24	-348.26	943.85	-1169.73
30	0.30	-9.89	138.67	-585.98	989.04	70	0.30	50.18	-344.19	925.47	-1136.50
30	0.35	-9.52	135.62	-573.93	969.85	70	0.35	50.02	-339.06	903.44	-1098.21
30	0.40	-9.27	133.89	-566.78	958.25	70	0.40	49.76	-333.04	878.33	-1055.54
30	0.45	-9.12	133.14	-563.32	952.41	70	0.45	49.47	-326.57	851.58	-1010.56
30	0.50	-9.05	133.20	-562.86	951.25	70	0.50	49.13	-319.67	823.29	-963.37
30	0.55	-9.04	133.87	-564.77	953.84	70	0.55	48.76	-312.38	793.61	-914.15
30	0.60	-9.08	135.09	-568.73	959.66	70	0.60	48.35	-304.74	762.64	-863.06
30	0.65	-9.16	136.72	-574.29	968.03	70	0.65	47.91	-296.78	730.57	-810.38
30	0.70	-9.27	138.69	-581.18	978.54	70	0.70	47.45	-288.55	697.56	-756.35
30	0.75	-9.41	140.99	-589.32	991.03	70	0.75	46.95	-280.08	663.69	-701.08
30	0.80	-9.58	143.54	-598.45	1005.13	70	0.80	46.44	-271.41	629.16	-644.91

Таблица Б.5

Коэффициенты аппроксимации падающего рассеянного потока излучения
для второго участка ФП

СЗУ	АОТ	k_1	k_2	k_3	k_4	СЗУ	АОТ	k_1	k_2	k_3	k_4
0	0.05	19.19	-109.40	215.24	-196.28	40	0.05	20.51	-115.33	228.05	-208.92
0	0.10	19.14	-109.79	220.39	-203.32	40	0.10	20.07	-113.23	227.38	-209.99
0	0.15	18.96	-108.65	220.48	-204.90	40	0.15	19.80	-111.47	225.87	-209.81
0	0.20	18.89	-107.91	220.46	-205.87	40	0.20	19.70	-110.40	225.01	-209.88
0	0.25	18.93	-107.59	220.84	-206.94	40	0.25	19.79	-110.35	225.84	-211.27
0	0.30	19.04	-107.67	221.75	-208.33	40	0.30	20.05	-111.22	228.36	-214.12
0	0.35	19.13	-107.61	222.15	-209.10	40	0.35	20.29	-111.91	230.28	-216.27
0	0.40	19.21	-107.50	222.28	-209.51	40	0.40	20.49	-112.42	231.67	-217.82
0	0.45	19.34	-107.67	222.93	-210.36	40	0.45	20.76	-113.29	233.73	-219.98
0	0.50	19.51	-108.09	224.04	-211.61	40	0.50	21.10	-114.58	236.66	-222.93
0	0.55	19.71	-108.71	225.52	-213.17	40	0.55	21.45	-115.95	239.67	-225.90
0	0.60	19.94	-109.49	227.29	-214.99	40	0.60	21.82	-117.48	242.97	-229.14
0	0.65	20.19	-110.40	229.31	-217.02	40	0.65	22.20	-119.05	246.33	-232.39
0	0.70	20.46	-111.42	231.54	-219.23	40	0.70	22.61	-120.75	249.93	-235.86
0	0.75	20.74	-112.53	233.95	-221.59	40	0.75	23.02	-122.52	253.67	-239.43
0	0.80	21.04	-113.73	236.53	-224.10	40	0.80	23.46	-124.45	257.70	-243.28
10	0.05	19.28	-109.89	216.45	-197.60	50	0.05	20.83	-115.49	227.31	-207.49
10	0.10	19.26	-110.48	222.07	-205.11	50	0.10	20.52	-114.12	228.18	-210.00
10	0.15	19.12	-109.56	222.59	-207.08	50	0.15	20.50	-113.79	229.70	-212.66
10	0.20	19.06	-108.82	222.58	-208.06	50	0.20	20.63	-114.02	231.58	-215.29
10	0.25	19.09	-108.52	222.99	-209.14	50	0.25	20.91	-114.95	234.49	-218.67
10	0.30	19.24	-108.81	224.29	-210.85	50	0.30	21.27	-116.34	238.10	-222.55
10	0.35	19.37	-108.91	224.92	-211.73	50	0.35	21.60	-117.56	241.14	-225.77
10	0.40	19.46	-108.84	225.13	-212.21	50	0.40	21.93	-118.72	243.87	-228.59
10	0.45	19.60	-109.07	225.91	-213.19	50	0.45	22.31	-120.14	247.04	-231.75
10	0.50	19.75	-109.39	226.80	-214.25	50	0.50	22.72	-121.75	250.57	-235.22
10	0.55	19.92	-109.78	227.81	-215.37	50	0.55	23.16	-123.60	254.54	-239.07
10	0.60	20.14	-110.49	229.45	-217.06	50	0.60	23.64	-125.61	258.80	-243.17
10	0.65	20.38	-111.35	231.36	-218.99	50	0.65	24.14	-127.75	263.29	-247.47
10	0.70	20.64	-112.30	233.43	-221.04	50	0.70	24.66	-130.03	268.06	-252.01
10	0.75	20.91	-113.35	235.70	-223.26	50	0.75	25.20	-132.42	273.06	-256.76
10	0.80	21.20	-114.51	238.16	-225.66	50	0.80	25.75	-134.91	278.22	-261.64
20	0.05	19.74	-112.43	222.29	-203.59	60	0.05	22.05	-120.11	235.73	-214.53
20	0.10	19.73	-112.98	227.67	-210.74	60	0.10	22.29	-121.80	242.82	-222.65
20	0.15	19.50	-111.51	226.94	-211.43	60	0.15	22.48	-122.53	246.51	-227.28
20	0.20	19.33	-110.14	225.45	-210.90	60	0.20	22.82	-123.82	250.58	-231.96
20	0.25	19.30	-109.40	224.85	-210.98	60	0.25	23.25	-125.56	255.16	-236.89
20	0.30	19.38	-109.26	225.26	-211.86	60	0.30	23.76	-127.69	260.24	-242.12
20	0.35	19.39	-108.73	224.60	-211.58	60	0.35	24.25	-129.65	264.73	-246.64
20	0.40	19.49	-108.68	224.84	-212.08	60	0.40	24.77	-131.69	269.20	-251.02
20	0.45	19.59	-108.64	224.99	-212.42	60	0.45	25.32	-133.99	274.14	-255.82
20	0.50	19.75	-109.01	225.96	-213.51	60	0.50	25.92	-136.56	279.60	-261.06
20	0.55	19.98	-109.72	227.60	-215.21	60	0.55	26.57	-139.41	285.57	-266.74
20	0.60	20.23	-110.62	229.62	-217.25	60	0.60	27.24	-142.37	291.75	-272.62
20	0.65	20.51	-111.69	231.97	-219.58	60	0.65	27.85	-145.06	297.49	-278.21
20	0.70	20.76	-112.56	233.83	-221.41	60	0.70	28.71	-148.97	305.37	-285.44
20	0.75	21.06	-113.74	236.38	-223.90	60	0.75	29.46	-152.43	312.48	-292.11
20	0.80	21.39	-115.16	239.41	-226.84	60	0.80	30.26	-156.08	319.96	-299.10
30	0.05	20.30	-115.13	228.15	-209.34	70	0.05	24.40	-129.34	252.19	-227.86
30	0.10	20.17	-114.94	231.79	-214.71	70	0.10	25.44	-135.41	268.54	-244.77
30	0.15	19.75	-112.32	228.46	-212.79	70	0.15	26.39	-140.29	280.89	-257.46
30	0.20	19.54	-110.67	226.37	-211.70	70	0.20	27.23	-144.17	290.23	-266.97
30	0.25	19.50	-109.85	225.55	-211.53	70	0.25	28.12	-148.26	299.58	-276.28
30	0.30	19.60	-109.83	226.18	-212.59	70	0.30	29.08	-152.58	309.04	-285.51
30	0.35	19.70	-109.78	226.54	-213.28	70	0.35	30.04	-156.92	318.32	-294.41
30	0.40	19.79	-109.69	226.66	-213.64	70	0.40	31.03	-161.33	327.55	-303.16
30	0.45	19.98	-110.15	227.85	-214.95	70	0.45	32.09	-166.13	337.50	-312.52
30	0.50	20.20	-110.75	229.29	-216.47	70	0.50	33.21	-171.25	348.05	-322.40
30	0.55	20.47	-111.71	231.45	-218.64	70	0.55	34.38	-176.66	359.12	-332.74
30	0.60	20.77	-112.89	234.03	-221.19	70	0.60	35.60	-182.32	370.65	-343.46
30	0.65	21.09	-114.12	236.71	-223.83	70	0.65	36.86	-188.22	382.65	-354.60
30	0.70	21.44	-115.56	239.80	-226.83	70	0.70	38.16	-194.30	394.99	-366.04
30	0.75	21.80	-117.08	243.03	-229.95	70	0.75	39.49	-200.55	407.66	-377.76
30	0.80	22.16	-118.60	246.25	-233.05	70	0.80	40.85	-206.97	420.64	-389.77

Таблица Б.6

Коэффициенты аппроксимации падающего рассеянного потока излучения
для третьего участка ФП

СЗУ	АОТ	k_1	k_2	k_3	СЗУ	АОТ	k_1	k_2	k_3
0	0.05	1.04	-9.20	6.45	40	0.05	1.54	-9.80	6.95
0	0.10	0.40	-6.03	3.37	40	0.10	0.49	-5.50	2.70
0	0.15	0.27	-4.77	2.19	40	0.15	0.49	-4.57	1.84
0	0.20	0.62	-5.07	2.53	40	0.20	0.62	-4.21	1.50
0	0.25	0.52	-4.18	1.65	40	0.25	0.75	-3.96	1.27
0	0.30	0.67	-4.11	1.57	40	0.30	0.89	-3.86	1.15
0	0.35	0.80	-4.02	1.48	40	0.35	1.04	-3.82	1.10
0	0.40	0.93	-3.99	1.43	40	0.40	1.19	-3.83	1.09
0	0.45	1.06	-3.99	1.41	40	0.45	1.32	-3.84	1.08
0	0.50	1.18	-4.00	1.40	40	0.50	1.46	-3.86	1.08
0	0.55	1.30	-4.03	1.41	40	0.55	1.60	-3.96	1.15
0	0.60	1.41	-4.06	1.42	40	0.60	1.74	-4.03	1.19
0	0.65	1.52	-4.10	1.44	40	0.65	1.87	-4.13	1.27
0	0.70	1.63	-4.15	1.47	40	0.70	2.00	-4.20	1.32
0	0.75	1.74	-4.20	1.49	40	0.75	2.12	-4.31	1.40
0	0.80	1.84	-4.26	1.52	40	0.80	2.24	-4.40	1.45
10	0.05	1.14	-9.43	6.69	50	0.05	1.67	-9.61	6.64
10	0.10	0.23	-5.55	2.89	50	0.10	0.80	-5.81	2.90
10	0.15	0.27	-4.75	2.17	50	0.15	0.77	-4.83	1.99
10	0.20	0.36	-4.29	1.75	50	0.20	0.92	-4.52	1.72
10	0.25	0.50	-4.09	1.55	50	0.25	1.05	-4.28	1.49
10	0.30	0.65	-3.99	1.46	50	0.30	1.20	-4.16	1.36
10	0.35	0.81	-4.01	1.46	50	0.35	1.37	-4.18	1.38
10	0.40	0.94	-3.95	1.39	50	0.40	1.52	-4.19	1.36
10	0.45	1.06	-3.95	1.37	50	0.45	1.69	-4.29	1.44
10	0.50	1.19	-3.98	1.38	50	0.50	1.85	-4.40	1.53
10	0.55	1.31	-4.00	1.38	50	0.55	2.01	-4.50	1.59
10	0.60	1.42	-4.03	1.39	50	0.60	2.15	-4.59	1.65
10	0.65	1.53	-4.08	1.41	50	0.65	2.29	-4.67	1.70
10	0.70	1.64	-4.13	1.43	50	0.70	2.43	-4.79	1.78
10	0.75	1.75	-4.18	1.46	50	0.75	2.56	-4.88	1.84
10	0.80	1.85	-4.24	1.50	50	0.80	2.70	-4.99	1.91
20	0.05	1.21	-9.46	6.69	60	0.05	1.95	-9.63	6.50
20	0.10	0.34	-5.71	3.04	60	0.10	1.13	-5.98	2.95
20	0.15	0.31	-4.73	2.14	60	0.15	1.15	-5.12	2.17
20	0.20	0.43	-4.35	1.79	60	0.20	1.32	-4.89	1.99
20	0.25	0.58	-4.17	1.62	60	0.25	1.52	-4.83	1.94
20	0.30	0.72	-4.06	1.51	60	0.30	1.71	-4.84	1.94
20	0.35	0.87	-4.01	1.45	60	0.35	1.89	-4.84	1.91
20	0.40	1.00	-3.98	1.39	60	0.40	2.06	-4.88	1.92
20	0.45	1.12	-3.96	1.35	60	0.45	2.22	-4.93	1.94
20	0.50	1.24	-3.97	1.34	60	0.50	2.39	-5.02	1.99
20	0.55	1.36	-3.97	1.32	60	0.55	2.56	-5.12	2.05
20	0.60	1.48	-4.02	1.34	60	0.60	2.72	-5.24	2.12
20	0.65	1.59	-4.07	1.37	60	0.65	2.89	-5.36	2.19
20	0.70	1.70	-4.12	1.38	60	0.70	3.05	-5.50	2.28
20	0.75	1.80	-4.16	1.40	60	0.75	3.21	-5.64	2.37
20	0.80	1.91	-4.22	1.43	60	0.80	3.37	-5.80	2.48
30	0.05	1.28	-9.44	6.65	70	0.05	2.24	-9.24	5.85
30	0.10	0.34	-5.47	2.76	70	0.10	1.74	-6.59	3.41
30	0.15	0.39	-4.66	2.01	70	0.15	1.83	-5.91	2.83
30	0.20	0.46	-4.16	1.55	70	0.20	2.05	-5.78	2.73
30	0.25	0.57	-3.88	1.30	70	0.25	2.28	-5.74	2.67
30	0.30	0.75	-3.88	1.27	70	0.30	2.49	-5.75	2.64
30	0.35	0.89	-3.81	1.19	70	0.35	2.72	-5.82	2.67
30	0.40	1.03	-3.78	1.13	70	0.40	2.94	-5.94	2.74
30	0.45	1.16	-3.79	1.12	70	0.45	3.17	-6.11	2.84
30	0.50	1.29	-3.81	1.11	70	0.50	3.40	-6.30	2.96
30	0.55	1.43	-3.88	1.16	70	0.55	3.63	-6.51	3.10
30	0.60	1.53	-3.89	1.14	70	0.60	3.86	-6.74	3.25
30	0.65	1.65	-3.93	1.15	70	0.65	4.10	-6.99	3.42
30	0.70	1.76	-3.98	1.18	70	0.70	4.33	-7.25	3.59
30	0.75	1.88	-4.06	1.22	70	0.75	4.56	-7.52	3.78
30	0.80	1.98	-4.12	1.26	70	0.80	4.80	-7.80	3.98

Приложение В

Акты и свидетельства



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное
бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Алтайский государственный университет»
пр-т Ленина, 61, г. Барнаул, 656049
Тел. (385-2) 291-291. Факс (385-2) 66-76-26
E-mail: rector@asu.ru

ОГРН 1022201770106 ИНН 2225004738/КПП 222501001
д/с 20176У88990 ОКПО 02067818
р/с 40501810401732000002 в ОТДЕЛЕНИЕ БАРНАУЛ г. Барнаул
ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный университет»

БИК 04 0173001

02.03.2016 № 10-2-21/05/1223-1
на № _____ от _____

В диссертационный
совет Д 212.269.09,
Национальный исследовательский
Томский политехнический университет
634050, г. Томск,
проспект Ленина, 30

Акт внедрения

результатов диссертационной работы Якунина М.А. «Контроль поглощённой подстилающей поверхностью солнечной энергии по данным спутникового мониторинга на основе спектрального подхода» на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.11.13 — приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий.

Сообщаю вам о том, что разработанный и представленный в диссертации Якунина М.А. программный модуль оперативного контроля поглощённой подстилающей поверхностью энергии по данным спектро радиометра MODIS внедрен и используется с 2015 года в отделе космического мониторинга и прогнозирования ЧС ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный университет».



Проректор по НИР
А.А. Тишкин



«УТВЕРЖДАЮ»

Директор института водных и
экологических проблем
СО РАН, д.г.н.

Ю.И. Винокуров

" 02 " марта 2016 г.

Справка

о внедрении результатов диссертационной работы аспиранта Алтайского государственного университета Якунина Максима Алексеевича «Контроль поглощённой подстилающей поверхностью солнечной энергии по данным спутникового мониторинга на основе спектрального подхода», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук.

Настоящей справкой подтверждаю, что выполненные в рамках диссертационной работы Якунина Максима Алексеевича исследования и их практическая реализация в виде программного модуля для оперативного контроля поглощенной подстилающей поверхностью энергии на обширных территориях используются при выполнении госбюджетного проекта, выполняемого в ИВЭП СО РАН по программе РАН IV.38.2.5. «Разработка информационно-аналитического обеспечения для исследования водно-экологических процессов в водоемах, водотоках и водосборах Сибири»

Предложенный диссертантом метод оперативного контроля поглощённой энергии, его методическое и программное обеспечение показали высокое быстродействие, эффективную работу и позволили с высокой точностью и надежностью проводить контроль поглощенной подстилающей поверхностью солнечной энергии на обширных территориях в окрестности водоемов, водотоков и водосборов Сибири.

Зав. лабораторией гидрологии и
геоинформатики ИВЭП СО АН,
д.т.н.

А.Г. Зиновьев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2015614781

Расчёт количества поглощённой солнечной энергии по
данным MODIS

Правообладатель: *Якунин Максим Алексеевич (RU)*

Автор: *Якунин Максим Алексеевич (RU)*

Заявка № 2015611632

Дата поступления 11 марта 2015 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 28 апреля 2015 г.

Врио руководителя Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Л.Л. Кирий



Литература

1. *Bauer, P.* The quiet revolution of numerical weather prediction / P. Bauer, A. Thorpe, G. Brunet // *Nature*. — 2015. — Vol. 525. — Pp. 47–55.
2. Mission to planet Earth: role of clouds and radiation in climate / B.A. Wielicki, R.D. Cess, M.D. King et al. // *Bull. Amer. Meteor. Soc.* — 1995. — Vol. 76, no. 11. — Pp. 2125–2153.
3. Earth's energy imbalance and implications / J. Hansen, M. Sato, P. Kharecha, K. von Schuckmann // *Atmos. Chem. Phys.* — 2011. — Vol. 11. — Pp. 13421–13449.
4. *Ohmura, A.* Observed decadal variations in surface solar radiation and their causes / A. Ohmura // *J. Geophys. Res.* — 2009. — Vol. 114. — P. D00D05.
5. *Wild, M.* Impact of global dimming and brightening on global warming / M. Wild, A. Ohmura, K. Makowski // *Geophys. Research Lett.* — 2007. — Vol. 34. — P. L04702.
6. *Suttles, J.T.* Surface radiation budget for climate applications / J.T. Suttles, G. Ohring // *NASA Reference Publication*. — 1986. — Vol. 1169.
7. *Smith, L.G.* — History of Earth radiation budget at Langley research center. — Langley Research Center, USA, 2010.
8. *Кондратьев, К. Я.* Глобальный климат / К. Я. Кондратьев. — СПб: Наука, 1992. — 358 с.
9. *Марчук, Г.И.* Радиационный баланс Земли: ключевые аспекты / Г.И. Марчук, К.Я. Кондратьев, В.В. Козодеров. — М.: Наука, 1988. — 224 с.
10. *Марчук, Г.И.* Межгодовая изменчивость компонентов радиационно-

- го баланса Земли по данным спутниковых измерений / Г.И. Марчук, К.Я. Кондратьев, О.А. Авасте // *Докл. АН. СССР.* — 1985. — Т. 280, № 1. — С. 65–70.
11. Global distribution of Earth's surface shortwave radiation budget / K. Hatzianastassiou, C. Matsoukas, A. Fotiadi et al. // *Atmos. Chem. Phys.* — 2005. — Vol. 5. — Pp. 2847–2867.
 12. Determining surface solar absorption from broadband satellite measurements for clear skies: comparison with surface measurements / R. D. Cess, J. J. DeLuisi, Ellsworth G. Dutton, F. Jiang // *J. Climate.* — 1991. — Vol. 4. — Pp. 236–247.
 13. Estimation of SW flux absorbed at the surface from TOA reflected flux / Zh. Li, H.G. Leighton, K. Masuda, T. Takashima // *J. Climate.* — 1993. — Vol. 6. — Pp. 317–330.
 14. Remote sensing of solar radiation absorbed and reflected by vegetated land and surfaces / R. B. Myneni, G Asrar, D. Tanre, et al. // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing.* — 1992. — march. — Vol. 30, no. 2. — Pp. 302–315.
 15. Determination of land surface heat fluxes over heterogeneous landscape of the Tibetan Plateau by using the MODIS and in situ data / Y. Ma, L. Zhong, B. Wang et al. // *Atmos. Chem. Phys.* — 2011. — Vol. 11. — Pp. 10461–10469.
 16. *Vonder Haar, T. H.* Measurements of the Earth's radiation budget from satellites during a five-year period. Part I: extended time and space means / T. H. Vonder Haar, V. E. Suomi // *J. Atmos. Sci.* — 1971. — Vol. 28, no. 3. — Pp. 305–314.
 17. *Pinker, R.T.* Modeling surface solar irradiance for satellite applications on a global scale / R.T. Pinker, I. Laszlo // *J. Climate Appl. Meteor.* — 1992. — Vol. 31. — Pp. 194–211.
 18. *Li, Zh.* Estimation of surface albedo from space: a parametrization for

- global application / Zh. Li, L. Garand // *J. Geophys. Res.* — 1994. — Vol. 99, no. D4. — Pp. 8335–8350.
19. *Pinker, R. T.* A review of satellite methods to derive surface shortwave irradiance / R. T. Pinker, R. Frouin, Z. Li // *Remote Sens. Environ.* — 1995. — Vol. 51. — Pp. 108–124.
 20. *Cess, R. D.* Inferring surface solar absorption from broadband satellite measurements / R. D. Cess, I. L. Vulis // *J. Climate.* — 1989. — Vol. 2. — Pp. 974–985.
 21. *Bishop, J. K. B.* Surface solar irradiance from the international satellite cloud climatology project 1983-1991 / J. K. B. Bishop, W. B. Rossow, E. G. Dutton // *J. Geophys. Res.* — 1997. — Vol. 102, no. D6. — Pp. 6883–6910.
 22. *Pinker, R. T.* Surface radiation budget from satellites / R. T. Pinker, R. Frouin, Z. Li // *Mon. Wea. Rev.* — 1984. — Vol. 112. — Pp. 209–215.
 23. *Wang, T.* Consistent retrieval methods to estimate land surface shortwave and longwave radiative flux components under clear-sky conditions / T. Wang, G. Yan, L. Chen // *Remote Sens. Environ.* — 2012. — Vol. 124. — Pp. 61–71.
 24. *Masuda, K.* A new parametrization for the determination of solar flux absorbed at the surface from satellite measurements / K. Masuda, H.G. Leighton, Z. Li // *J. Climate.* — 1995. — Vol. 8. — Pp. 1615–1629.
 25. *Tang, B.* A direct method for estimating net surface shortwave radiation from MODIS data / B. Tang, Z.-L. Li, R. Zhang // *Remote Sens. Environ.* — 2006. — Vol. 103. — Pp. 115–126.
 26. *Kim, H.-Y.* Developement of a hybrid method for estimating land shortwave net radiation from MODIS data / H.-Y. Kim, S. Liang // *Remote Sens. Environ.* — 2010. — Vol. 114. — Pp. 2393–2402.
 27. *Wang, D.* Mapping high-resolution surface shortwave net radiation from

- Landsat data / D. Wang, S. Liang, T. He // *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.* — 2014. — Vol. 11, no. 2. — Pp. 459–463.
28. Estimation of daily surface shortwave net radiation from the combined MODIS data / D. Wang, S. Liang, T. He, Q. Shi // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* — 2015. — Vol. 53, no. 10. — Pp. 5519–5528.
 29. Estimation of high-resolution land surface net shortwave radiation from AVIRIS data: Algorithm development and preliminary results / T. He, S. Liang, D. Wang et al. // *Remote Sens. Environ.* — 2015. — Vol. 167. — Pp. 20–30.
 30. Surface shortwave net radiation estimation from FengTun-3 MERSI data / D. Wang, S. Liang, T. He et al. // *Remote Sens.* — 2015. — Vol. 7. — Pp. 6224–6239.
 31. Evaluation of satellite and reanalysis products of downward surface solar radiation over East Asia: Spatial and seasonal variations / B. Jia, Z. Xie, A. Dai et al. // *J. Geophys. Res. Atmos.* — 2013. — Vol. 118. — Pp. 3431–3446.
 32. *Kiehl, J.T.* Earth’s annual global mean energy budget / J.T. Kiehl, K.E. Trenberth // *Bull. Amer. Meteor. Soc.* — 1997. — Vol. 78, no. 2. — Pp. 197–208.
 33. *Trenberth, K.E.* Earth’s global energy bunget / K.E. Trenberth, J.T. Fasullo, J. Kiehl // *Bull. Amer. Meteor. Soc.* — 2009. — Vol. 90. — Pp. 311–324.
 34. *Bateni, S.M.* Estimating surface energy fluxes using a dual-source data assimilation approach adjoined to the heat diffusion equation / S.M. Bateni, S. Liang // *J. Geophys. Res.* — 2012. — Vol. 117. — P. D17118.
 35. *Cracknell, A.P.* Global climatology and ecodynamics. Anthropogenic changes to planet Earth / A.P. Cracknell, V.F. Krapivin, C.A. Varotsos. — Springer, 2009. — 518 pp.

36. Lighting monitoring and its application in the radiation balance research / M.A. Yakunin, A.G. Yakunin, Suchkova L.I., Hussein H.M. // *Материалы 14 Международной конференции «Измерение, контроль, информатизация»*. — 2013. — С. 24–27.
37. Wang, K. Estimation of daytime net radiation from shortwave radiation measurements and meteorological observations / K. Wang, S. Liang // *J. Appl. Meteor. Clim.* — 2008. — Vol. 48. — Pp. 634–643.
38. Dickinson, R.E. Land processes in climate models / R.E. Dickinson // *Remote Sens. Environ.* — 1995. — Vol. 51, no. 1. — Pp. 27–38.
39. Pinker, R.T. Do satellites detect trends in surface solar radiation? / R.T. Pinker, B. Zhang, E.G. Dutton // *Science*. — 2005. — Vol. 308. — Pp. 850–854.
40. 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.
41. 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.
42. 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.
43. 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.
44. Якунин, М. А. Вычисление фрактальной размерности облаков по

- данным спутниковых наблюдений MODIS/TERRA / М. А. Якунин, А. А. Лагутин // *Измерение, контроль, информатизация: Материалы одиннадцатой международной научно-технической конференции.* — 2010. — С. 112–114.
45. 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.
46. 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.
47. 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.
48. 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.
49. 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.
50. 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.
51. 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.
52. *Якунин, М. А.* Автоматизированный оперативный комплекс восстановления радиационного 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.
53. 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.
54. *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.
55. Многоточечная система дистанционного мониторинга пространственно-распределённых динамических процессов / Л.И. Сучкова, Х.М. Хуссейн, Р.В. Кунц и др. // *Контроль, диагностика.* — 2013. — Т. 13. — С. 95–101.
56. Программно-технические и алгоритмические решения для систем многоточечного 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.
57. *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.
58. *Moran, S.M.* The scaling characteristics of remotely-sensed variables for sparsely-vegetated heterogeneous landscapes / S.M. Moran, K.S. Humes, P.J. Pinter Jr. // *Journal of Hydrology*. — 1997. — Vol. 190. — Pp. 337–362.
 59. High spatial resolution remotely sensed data for ecosystems characterization / A.M. Wulder, Hall. R.J., N.C. Coops, S.E. Franklin // *BioScience*. — 2004. — Vol. 54, no. 6. — Pp. 511–521.
 60. Effect of remote sensing spatial resolution on interpreting tower-based flux observations / F. Li, W.P. Kustas, M.C. Anderson et al. // *Remote Sens. Environ.* — 2004. — Vol. 112. — Pp. 337–349.
 61. Estimating subpixel surface temperatures and energy fluxes from the vegetation index-radiometric temperature relationship / W.P. Kustas, J.M. Norman, M.C. Anderson, A.N. French // *Remote Sens. Environ.* — 2003. — Vol. 85. — Pp. 429–440.
 62. Effects of remote sensing pixel resolution on modeled energy flux variability of croplands in Iowa / W.P. Kustas, F. Li, T.J. Jackson et al. // *Remote Sens. Environ.* — 2004. — Vol. 92. — Pp. 535–547.
 63. *Soci, C.* Sensitivity of high-resolution forecasts using the adjoint technique at the 10-km scale / C. Soci, C. Fischer, A. Horanyi // *Mon. Wea. Rev.* — 2006. — Vol. 134. — Pp. 772–790.
 64. A global database of land surface parameters at 1-km resolution in meteorological and climate models / V. Masson, J.-L. Champeaux, F. Chauvin et al. // *J. Climate*. — 2003. — Vol. 16, no. 9. — Pp. 1261–1282.
 65. *Bromwich, D.H.* High-resolution regional climate simulations over iceland using polar MM5* / D.H. Bromwich, L. Bai, G.G. Bjarnason // *Mon.*

- Wea. Rev. — Special Section.* — 2005. — Vol. 133. — Pp. 3527–3547.
66. <http://eospsso.nasa.gov/>.
 67. <http://terra.nasa.gov/About/index.php>.
 68. *Parkinson, C.L.* Aqua: an Earth-observing satellite mission to examine water and other climate variables / C.L. Parkinson // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing.* — 2009. — Vol. 41, no. 2. — Pp. 173–183.
 69. <http://modis.gsfc.nasa.gov/about/specifications.php>.
 70. *Salomonson, V. V.* MODIS: advanced facility instrument for studies of the Earth as a system / V. V. Salomonson, W. L. Barnes, P. W. et al. Maymon // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing.* — 1989. — Vol. 27. — Pp. 145–153.
 71. The moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS): land remote sensing for global change research / J.O. Chrostopher, E. Vermote, J.R.G. Townshend et al. // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing.* — 1998. — Vol. 36, no. 4. — Pp. 1228–1249.
 72. <http://npp.gsfc.nasa.gov/datasystems.html>.
 73. <http://ladsweb.nascom.nasa.gov/>.
 74. *Лагутин, А. А.* Математические технологии оперативного регионального спутникового мониторинга характеристик атмосферы и подстилающей поверхности. Ч.1. MODIS / А. А. Лагутин, Ю. А. Никулин, А. П. и др. Жуков // *Вычисл. технологии.* — 2007. — Т. 12, № 2. — С. 67–77.
 75. *Levy, R.C.* The collection 6 MODIS aerosol products over land and ocean / R.C. Levy, S. Mattoo, L.A. et al. Munchak // *Atmos. Meas. Tech.* — 2013. — Vol. 6. — Pp. 2989–3034.
 76. *Sayer, A.M.* MODIS collection 6 aerosol products: Comparison between Aqua’s e-Deep blue, dark target, and “merged” data sets, and usage recommendations / A.M. Sayer, L.A. Munchak, N.C. et al. Hsu // *J. Geophys. Res. Atmos.* — 2014. — Vol. 119. — Pp. 13965–13989.

77. Atmospheric radiative transfer modeling: a summary of the AER codes / S. A. Clough, M. W. Shephard, E. J. Mlawer, et. al // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.* — 2005. — Vol. 91. — Pp. 223–244.
78. <http://6s.ltdri.org>.
79. Validation of a vector version of 6S radiative transfer code for atmospheric correction of satellite data. Part I: Path radiance / S. Y. Kotchenova, E. F. Vermote, R. Materrese, Klemm F. J. Jr. // *Applied Optics.* — 2006. — Vol. 45, no. 26. — Pp. 6762–6774.
80. *Cornette, W. M.* — Moderate spectral atmospheric radiance and transmittance code MOSART, 2011. — December.
81. <http://www.cpi.com/capabilities/rt.html>.
82. *Berk, A.* — MODTRAN5.2.1 USER'S MANUAL, 2011.
83. Numerically stable algorithm for discrete-ordinate-method radiative transfer in multiple scattering and emitting layered media / K. Stamnes, S-Ch. Tsay, W. Wiscombe, K. Jayaweera // *Applied Optics.* — 1988. — Vol. 27, no. 12. — Pp. 2502–2509.
84. *Fu, K.* On the correlated k-distribution for radiative transfer in nonhomogeneous atmospheres / K. Fu, K.N. Liou // *J. Atmos. Sci.* — 1992. — Vol. 49, no. 22. — Pp. 2139–2156.
85. MODTRAN4: multiple scattering and bi-directional reflectance distribution function (BRDF) upgrades to MODTRAN / P.K. Acharya, A. Berk, G.P. Anderson et al. // *Optical Spectroscopic Techniques and Instrumentation for Atmospheric and Space Research III.* — 1999. — Vol. 3756.
86. MODTRAN4 radiative transfer modeling for atmospheric correction / A. Berk, G.P. Anderson, L.S. Bernstein et al. // *Optical Spectroscopic Techniques and Instrumentation for Atmospheric and Space Research III.* — 1999. — Vol. 3756.
87. *Ross, V.* Experimental validation of the MODTRAN 5.3 sea surface

- radiance model using MIRAMER campaign measurements / V. Ross, D. Dion, D. St-Germain // *Applied Optics*. — 2012. — Vol. 51. — Pp. 2264–2276.
88. *Kneizys, F.X.* — The MODTRAN 2/3 report and LOWTRAN 7 MODEL, 1996.
89. *Barkstrom, B.R.* The Earth radiation budget experiment (ERBE) / B.R. Barkstrom // *Bull. Amer. Meteor. Soc.* — 1984. — Vol. 65, no. 11. — Pp. 1170–1185.
90. <http://science.larc.nasa.gov/erbe/>.
91. <http://www.nasa.gov/centers/langley/news/factsheets/ERBE.html>.
92. <http://asd-www.larc.nasa.gov/erbe/ASDerbe.html>.
93. Results from the Earth radiation budget experiment (ERBE) / B. R. Barkstorm, E. F. Harrison, G. L. Smith, R. D. Cess // *Advances in Space Research*. — 1989. — Vol. 9, no. 7. — Pp. 75–82.
94. <http://isccp.giss.nasa.gov/>.
95. Измерения компонентов радиационного баланса Земли с ИСЗ «Метеор-М» №1. Аппаратура ИКОР-М / Ю.А. Скляр, В.А. Воробьёв, А.И. Котума и др. // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. — 2012. — Т. 9, № 2. — С. 173–180.
96. Алгоритм обработки данных наблюдений уходящей коротковолновой радиации с ИСЗ «Метеор-М» №1 / Ю.А. Скляр, В.А. Воробьёв, А.И. Котума и др. // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. — 2012. — Т. 9, № 3. — С. 83–90.
97. *Сивков, С. И.* Методы расчёта характеристик солнечной радиации / С. И. Сивков. — Л.: Гидрометеиздат, 1968. — 232 с.
98. *Тимофеев, Ю.М.* Основы теоретической атмосферной оптики / Ю.М. Тимофеев, А.В. Васильев. — СПб.: Научно-образовательный центр «Моделирование и мониторинг геосфер», 2007. — 152 с.
99. *Schmetz, A.* Towards a surface radiation climatology: retrieval of

- downward irradiances from satellites / A. Schmetz // *Atmospheric Research*. — 1989. — Vol. 23. — Pp. 287–321.
100. Assessment of three satellite-estimated land surface downwelling shortwave irradiance data sets / S. Gui, S. Liang, K. Wang et al. // *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.* — 2010. — Vol. 7, no. 4. — Pp. 776–780.
101. An efficient physically based parametrization to derive surface solar irradiance based on satellite atmospheric products / J. Qin, W. Tang, K. Yang et al. // *J. Geophys. Res. Atmos.* — 2015. — Vol. 120. — Pp. 4975–4988.
102. *Liang, S.* Retrieval of land surface albedo from satellite observations: a simulation study / S. Liang, A.H. Strahler, C. Walthall // *J. Appl. Meteor.* — 1999. — Vol. 38. — Pp. 712–725.
103. Mapping surface broadband albedo from satellite observations: a review of literatures on algorithms and products / Y. Qu, S. Liang, Q. Liu et al. // *Remote Sens.* — 2015. — Vol. 7. — Pp. 990–1020.
104. The ASTER spectral library version 2.0 / A. M. Baldridge, S. J. Hook, C. I. Grove, G. Rivera // *Remote Sens. Environ.* — 2009. — Vol. 113. — Pp. 711–715.
105. *Chance, K.* An improved high-resolution solar reference spectrum for Earth's atmosphere measurements in the ultraviolet, visible, and near infrared / K. Chance, R.L. Kurucz // *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*. — 2010. — Vol. 111, no. 9. — P. 1289–1295.
106. *Ленобль, Ж.* Перенос радиации в рассеивающих и поглощающих атмосферах. Стандартные методы расчёта / Ж. Ленобль. — Л.: Гидрометеоиздат, 1990. — 264 с.
107. *Augustine, J. A.* SURFRAD - A national surface radiation budget network for atmospheric research / J. A. Augustine, J. Deluisi, C. N. Long // *Bull. Amer. Meteor. Soc.* — 2000. — Vol. 81, no. 10. — Pp. 2341–2357.
108. <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/grad/surfrad/index.html>.

109. *Калиткин, Н.Н.* Численные методы: учебное пособие под. ред. А.А. Самарского / Н.Н. Калиткин. — М.: Наука, 1978. — 512 с.
110. *Бахвалов, Н.С.* Численные методы: учебное пособие под. ред. А.А. Самарского / Н.С. Бахвалов, Н.П. Жидков, Кобельков Г.М. — М.: Бином, 2008. — 640 с.
111. *Матьюз, Д.Г.* Численные методы / Д.Г. Матьюз, Д. Финк Куртис. — Вильямс, 2001. — 720 с.
112. <http://matlab.ru/products/curve-fitting-toolbox>.
113. *Клочков, С.В.* Метрология, стандартизация и сертификация / С.В. Клочков. — М.: Гуманитар. изд. центр ВЛАДОС, 2010. — 398 с.
114. *Пономарёв, С.В.* Метрология, стандартизация, сертификация / С.В. Пономарёв, Г.В. Шишкина, Г.В. Мозгова. — Тамбов: Изд-во ГОУ ВПО ТГТУ, 2010. — 96 с.
115. *Подиновский, В.В.* Парето-оптимальные решения многокритериальных задач / В.В. Подиновский, Ногин В.Д. — М.: Наука, 1989.
116. *Andrews, D. G.* An introduction to atmospheric physics / D. G. Andrews. — Cambridge University Press, 2010. — 237 pp.
117. *Якунин, А.Г.* База данных системы контроля динамических процессов (Dynamic-1). Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2015620793, заявка 2015620245, дата рег. 22.05.2015. — М.: Роспатент, 2015.
118. *Суторихин, И.А.* База данных для ГИС «Аэрозоли Алтай» / И.А. Суторихин, Б.Н. Дмитриев // *Ползуновский вестник*. — 2014. — Т. 2. — С. 138–142.
119. Измерительный комплекс для регистрации параметров окружающей среды на водном объекте / В.В. Зуев, И.А. Суторихин, А.П. Шелехов и др. // *Ползуновский вестник*. — 2014. — Т. 2. — С. 188–190.