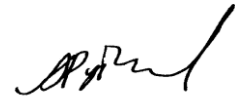


На правах рукописи



РУБЛЕВ Алексей Николаевич

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕНОСА ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
В ЗАДАЧАХ РАДИАЦИОННОЙ КЛИМАТОЛОГИИ
И ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЗЕМНОЙ АТМОСФЕРЫ**

25.00.29 – физика атмосферы и гидросферы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Москва, 2013

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении
«Научно-исследовательский центр «Планета»

Официальные оппоненты:

ГИНЗБУРГ Александр Самуилович

доктор физико-математических наук,
Институт физики атмосферы им. А. М. Обухова
РАН, заместитель директора

КАРГИН Борис Александрович

доктор физико-математических наук,
профессор, Институт вычислительной
математики и математической геофизики СО
РАН, заведующий лабораторией
стохастических задач

ТИМОФЕЕВ Юрий Михайлович

доктор физико-математических наук,
профессор, Санкт-Петербургский
государственный университет, заведующий
кафедрой физики атмосферы физического
факультета

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
учреждение «Гидрометеорологический научно-исследовательский центр
Российской Федерации».

Защита состоится «10» октября 2013 г. в 11 часов на заседании
диссертационного совета Д 002.09601 при Институте физики атмосферы
им. А. М. Обухова РАН по адресу: 119017, Москва, Пыжевский пер., д. 3.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института физики
атмосферы им. А. М. Обухова РАН.

Автореферат разослан «____» _____ 2013 г.

Ученый секретарь



диссертационного совета

Краснокутская Людмила Дмитриевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследований. В течение последних десятилетий заметно вырос интерес общества к проблемам изменения климата и, особенно, к наблюдаемому глобальному потеплению. Изменчивость климата и температурного режима обусловлена поведением различных естественных и антропогенных факторов, регулирующих радиационный обмен Земли с космосом.

С точки зрения анализа антропогенного влияния на изменения климата наиболее важен промышленный выброс углекислого газа (CO_2). Как указывается в последнем докладе, выпущенном в 2007 г. Межправительственной группой экспертов по изменению климата Всемирной Метеорологической Организации, удвоение содержания CO_2 в атмосфере приведет к уменьшению мощности уходящего в космос излучения на 3.7 Вт/м^2 и возрастанию средней глобальной температуры на 2.5 К . Подобные оценки основаны на результатах физико-математического моделирования климатических изменений.

Главным естественным фактором, влияющим на температурный режим атмосферы, является облачность. Несмотря на то, что облачность определяет около $2/3$ планетарного альбедо, не только величина ее суммарного радиационного воздействия (форсинга), но и знак не были оценены до конца 80-х гг. XX века. Современные оценки облачного форсинга дают разброс $-15 \div -21 \text{ Вт/м}^2$, вследствие сильной изменчивости свойств облачности как по времени, так и по географическим регионам.

Количественное описание радиационного воздействия перечисленных и других факторов – задача радиационных блоков современных гидродинамических моделей прогноза погоды и изменения климата Земли.

В настоящее время существуют определенные проблемы адекватного учета указанных факторов при описании процессов переноса излучения в атмосфере для оценки радиационного форсинга. Во-первых, это методические трудности, связанные с разработкой приближенных, но достаточно точных и быстрых алгоритмов для радиационных блоков, которые могли бы корректно учитывать основные эффекты переноса солнечного или теплового излучения в реальной атмосфере.

Во-вторых, это проблема организации постоянного мониторинга состояния атмосферы для измерения или оценки параметров, используемых в качестве исходных данных гидродинамических моделей. Для такого мониторинга необходима глобальная система наблюдений, важнейшей компонентой которой является космическая система наблюдений. Несмотря на то, что методы дистанционного зондирования атмосферы (ДЗА) получили значительное развитие в последнее двадцатилетие, остается много задач ДЗА, требующих дальнейших методических проработок с целью повышения точности и достоверности получаемых оценок атмосферных параметров по данным спутниковых и наземных дистанционных измерений.

Проиллюстрируем существующие методические трудности при разработке радиационных алгоритмов гидродинамических моделей и проблемы повышения достоверности продуктов ДЗА на двух примерах.

Примером несовершенства радиационных алгоритмов является известный эффект «аномального облачного поглощения», т.е. завышение на 5-28 Вт/м² среднесуточного поглощения солнечного излучения (СИ), получаемого по наземным и самолетным измерениям, относительно расчетных результатов. Это завышение превышает радиационный эффект удвоения содержания CO₂, поэтому возникают сомнения в надежности количественных оценок климатического эффекта диоксида углерода современными моделями, а значит, и тесно связанного с ним антропогенного воздействия на динамику глобального потепления.

К чему приводит разброс в оценках используемых величин атмосферных параметров, полученных на основе дистанционных измерений, можно видеть на примере альбедо однократного рассеяния (АОР) пылевого аэрозоля – важнейшего оптического параметра для всех климатических моделей. Например, в работах, опубликованных в 2001-2002 гг., указывается, что сахарская пыль поглощает всего 1-5% падающего СИ, по сравнению с 10-15%, полученными в середине 80-х – начале 90-х гг. XX в. Такое снижение в оценках поглощения СИ объясняется

величиной АОР пылевого аэрозоля, которое, по «новым» данным, меняется в диапазоне $0.95 \div 0.98$. Согласно «старым» данным диапазон изменчивости этой же величины составил $0.70 \div 0.88$.

Приведенные примеры подтверждают актуальность исследований, выполненных в диссертации и направленных на разработку комплекса строгих радиационных методик и алгоритмов, пригодность которых для прогнозирования климатических изменений и дистанционного определения параметров атмосферы подтверждена реальными натурными экспериментами.

Степень разработанности научной проблемы. Разработке методик и алгоритмов для установления точных количественных зависимостей между энергетическими характеристиками СИ или собственного излучения атмосферы с ее основными метеорологическими параметрами для прогнозирования климата и решения задач ДЗА посвящено большое количество работ. Теоретическое обоснование разнообразных радиационных алгоритмов приведено, например, в известном обзоре под редакцией Жаклин Ленобль (Jacqueline Lenoble), где, в частности, отражен значительный вклад, который внесли в развитие теории переноса атмосферной радиации различные научные школы Советского Союза. В обзоре выполнен сравнительный анализ результатов расчетов характеристик СИ, полученных на основе рассмотренных методов, для фиксированных моделей атмосферы. Фактически, это было одно из первых международных тестирований радиационных алгоритмов. За последние два десятилетия подобные тестирования были выполнены для расчетов интегральных потоков как собственного, так и СИ. В 1999 г. начала свою деятельность международная рабочая группа I3RC (Intercomparison of 3D Radiation Codes) под руководством Роберта Кахалана (Robert Cahalan) по сравнению трехмерных радиационных алгоритмов, позволяющих учитывать стохастические свойства разорванной облачности

Как правило, радиационные алгоритмы отражают уровень нашего понимания физики переноса оптического излучения в атмосфере, который достигнут к моменту их разработки. Существенный, но неучтенный в алгоритмах физический фактор может вызывать большое расхождение между результатами натурных измерений и расчетов, не нарушая согласия в результатах параллельных,

формально независимых расчетов. В связи с этим в последнее время основным способом подтверждения адекватности радиационных алгоритмов и создаваемых на их основе методик ДЗА стало сравнение расчетных результатов или оценок параметров атмосферы с данными измерений, проводимых на специальных тестовых полигонах при тщательном контроле атмосферных условий. Этот подход реализован в диссертации, значительная часть которой посвящена валидации разработанных методик и алгоритмов путем прямого сравнения получаемых результатов с данными измерений.

Цель и задачи работы. Целью диссертации является разработка и валидация методик и алгоритмов для решения различных задач радиационной климатологии и дистанционного определения параметров атмосферы на основе моделирования переноса солнечного и теплового излучения с подробным учетом основных факторов, определяющих его распространение и регистрацию наземной или спутниковой аппаратурой.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- разработка реалистических моделей земной атмосферы, отражающих стохастический характер и многообразие различных форм облачности;
- разработка методик и алгоритмов для получения количественных оценок интенсивности и потоков солнечного и теплового излучения в различных условиях и их валидация по данным натурных измерений;
- разработка и валидация способа детектирования облачности по измерениям спутниковых ИК-зондировщиков высокого спектрального разрешения;
- разработка и валидация методик дистанционного определения в атмосфере средней концентрации и потоков углекислого газа;
- оценка влияния пылевого аэрозоля на точность определения оптических и радиационных параметров атмосферы по данным наземных измерительных сетей;
- разработка и валидация методики дистанционного определения общего содержания (ОС) в атмосфере диоксида азота NO_2 .

Научная новизна:

1. Впервые создана реляционная база полностью определенных модельных облачных ситуаций на основе подготовленного в NOAA набора данных радиозондирования (около 8000 вертикальных профилей в различных регионах земного шара). Отличительной особенностью созданной базы является сохранение в моделях корреляционных связей между вертикальными профилями температуры/влажности и параметрами облачности.

2. Разработана новая методика моделирования разорванной облачности нормальным случайным полем, параметры корреляционной функции которой определяются только баллом, средними диаметром и толщиной облаков.

3. Для СИ и собственного теплового излучения атмосферы разработаны трехмерные алгоритмы метода МК с полинейным учетом газового поглощения, позволяющие вычислять вертикальные профили потоков оптического излучения, а также моделировать измерения спутниковых спектрометров при различных типах облаков, включая разорванную и многослойную облачность.

4. На основе сопряженного уравнения метода Монте-Карло (МК) с полинейным учетом газового поглощения созданы алгоритмы вычислений интенсивностей и потоков СИ применительно к сферической модели атмосферы. Впервые на основе расчетов получены угловые матрицы коэффициентов анизотропии уходящего СИ для интерпретации спутниковых измерений радиационного баланса Земли.

5. Разработана новая методика моделирования собственного излучения облачных или пылевых слоев с учетом их рассеивающих свойств для использования в быстрых радиационных моделях.

6. Разработан новый способ детектирования облачности «подпиксельного» размера и оценена его надежность применительно к данным спутникового ИК-зондировщика IASI и самолетного интерферометра NAST-I.

7. Впервые получены количественные оценки влияния крупных пылевых частиц на точность восстановления оптических характеристик аэрозоля по измерениям спектральных потоков прямого и рассеянного солнечного излучения глобальной сетью AERONET.

8. Разработана новая методика определения концентрации тропосферного углекислого газа по измерениям спутникового спектрометра SCIAMACHY/ENVISAT в условиях облачности. Сравнение с результатами независимых измерений в различных географических регионах позволило оценить ее точность: $\sim 1\%$ или $3\text{--}4 \text{ млн}^{-1}$.

9. Разработана новая методика определения ОС NO_2 по данным измерений спектральных оптических толщин аэрозоля глобальной сети AERONET и проведена ее валидация путем сравнения с результатами независимых измерений.

10. Создано новое интерактивное программно-математическое обеспечение – CSIF2002/2009 для расчета солнечных потоков и оценки радиационного форсинга NO_2 и аэрозоля в зависимости от состояния атмосферы.

Теоретическая и практическая значимость работы. Результаты работы использовались при интерпретации измерений спутникового радиометра SCARAB/Метеор для оценки компонент радиационного баланса Земли. Вычисления спектральных интенсивностей собственного излучения атмосферы и подстилающей поверхности применялись для обоснования процедур интеркалибровки ИК-каналов спутниковых отечественных сканеров МСУ-МР/Метеор-М и МСУ-ГС/Электро-Л по их зарубежным аналогам. Результаты расчетов спектральных солнечных потоков используются в Метеорологической обсерватории (МО) Географического факультета МГУ для тестирования эмпирических методик.

Алгоритм и результаты расчетов аэрозольных параметров вошли в качестве составной части в европейскую спектроскопическую базу данных GEISA [Jacquinet-Husson et al, 2005, 2008]. Интерактивное программно-математическое обеспечение CSIF2002/2009 используется в ряде научных организаций для расчета потоков СИ и оценок радиационного влияния аэрозоля и диоксида азота. Разработанный алгоритм определения ОС диоксида азота по измерениям AERONET будет использован для валидации оценок его содержания по данным отечественного спектрометра СА-МП (аналога спектрометра SCIAMACHY), который должен быть установлен на полярно-орбитальном спутнике нового поколения «Метеор-МП».

На основе расчетов автора в Гидрометцентре России для тестирования и развития радиационных алгоритмов в моделях прогноза погоды была создана специальная «База данных эталонных потоков солнечного и теплового излучения», на которую получено Свидетельство о государственной регистрации №20126220475 от 25 мая 2012 г.

Разработанные алгоритмы и результаты расчетов использовались в рамках федеральных целевых и ведомственных программ: «Создание и развитие системы мониторинга геофизической обстановки над территорией Российской Федерации», «Федеральная космическая программа России»; при обосновании характеристик целевой аппаратуры полярно-орбитальных и геостационарных метеоспутников, при оценке в Ситуационном центре Росгидромета последствий распространения вулканического пепла от исландских вулканов Эйяфьятлайокудль и Гримсвотн, а также при выполнении грантов РФФИ, международных фондов МНТЦ, CRDF, INTAS, американской программы ARM, Европейского космического агентства ESA и Европейской организации по эксплуатации метеорологических спутников EUMETSAT.

Методология исследования. При разработке радиационных алгоритмов и методик проводились теоретико-экспериментальные исследования, основанные на комбинации математического моделирования процессов переноса оптического излучения с анализом данных натурных измерений, получаемых из различных источников. Разработке способов дистанционного определения параметров атмосферы предшествовало моделирование измерений с подробным учетом специфики используемых приборов и различного рода ошибок.

Положения, выносимые на защиту

1. Глобальная база данных метеорологических и оптических моделей атмосферы, созданная на основе анализа 8000 вертикальных профилей температуры и влажности по данным радиозондовых измерений NOAA в различных районах земного шара.
2. Методика и алгоритм моделирования разорванной облачности нормальным случайным полем.

3. Трехмерные алгоритмы метода МК для вычисления потоков и интенсивностей СИ и собственного излучения атмосферы при различных типах облаков, включая разорванную и многослойную облачность.
4. Методика получения угловых моделей анизотропии СИ для интерпретации спутниковых измерений радиационного баланса Земли.
5. Методика детектирования облачности по измерениям спутниковых ИК-зондировщиков высокого спектрального разрешения.
6. Методика оценки средней концентрации углекислого газа по измерениям спектрометра SCIAMACHY/ENVISAT.
7. Методика и алгоритм определения ОС NO_2 по данным глобальной аэрозольной сети AERONET.
8. Интерактивное программно-математическое обеспечение – CSIF2002/2009 (<http://litms.molnet.ru/csif/index.php>) для расчета интегральных солнечных потоков и оценки радиационного форсинга NO_2 и аэрозоля.

Степень достоверности и апробация результатов. Разработанные радиационные алгоритмы для расчета потоков и интенсивностей оптического излучения основаны на высокоточном моделировании процесса переноса фотонов методом МК с полинейным учетом газового поглощения. Все разработанные методики и алгоритмы дистанционного определения параметров атмосферы проходили проверку путем прямого сравнения модельных расчетов с результатами независимых расчетов или измерений, выполненных в различных районах земного шара.

По результатам диссертационной работы опубликовано 69 работ, из них 47 в изданиях, включенных в список ВАК, и рецензируемых трудах международных конференций, 23 – в трудах конференций и препринтах Курчатовского института.

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на международных и российских конференциях: Coordination Group for Meteorological Satellites (2010-2012), Workshop *Global Space-based Inter-Calibration System* (2011, 2012), International Radiation Symposium (1996, 2000, 2008, 2012); Gordon Research Conference (2003, 2005); ARM Science Team Meetings (2002, 2004); International assembly of the American Geophysical Union (1998, 2007);

Международном симпозиуме стран СНГ «Атмосферная радиация» (1998, 2002, 2004, 2011); Meteorological Satellite Conference (2000, 2004, 2007), International Symposium on Remote Sensing of Environment (2005), Workshop *Intercomparison of 3D Radiation Codes* (1999, 2005) и др. Результаты работы представлялись на научных семинарах в различных институтах, включая РНЦ «Курчатовский институт»; НИЦ «Планета»; ИФА им. А. М. Обухова; Гидрометцентр России; ИКИ РАН; МО МГУ; Goddard Space Flight Center; John Hopkins University; Canada Centre for Remote Sensing; Institute of Remote Sensing (Bremen), Институт леса им. В. Н. Сукачева.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Диссертация состоит из введения, 6 глав и заключения. Во **введении** приводится обоснование актуальности темы исследования, обсуждается степень ее разработанности, формулируются цель и задачи работы, ее научная новизна, теоретическая и практическая значимость. Кратко описывается методология исследований, перечисляются положения, выносимые на защиту, приводятся сведения о достоверности и апробации результатов, а также о личном вкладе автора.

В **первой главе** описано построение глобальной базы данных (БД) по метеорологическим и оптическим моделям атмосферы. Основой для построения БД атмосферных моделей послужил известный набор радиозондовых измерений NOAA-88/89. Всего в наборе NOAA-88/89 представлены примерно 8000 вертикальных профилей температуры и влажности на стандартной сетке по давлению. Набор был получен компиляцией по всему земному шару реальных измерений, проведенных в 1988-89 годах.

Методика определения параметров облачности по особенностям поведения зависимостей температуры $T(H)$ и относительной влажности $R(H)$ от высоты H описана в разделе 1.1. Вертикальные профили $T(H)$ и влажности $R(H)$ дважды дифференцируются. В соответствии с рекомендациями Chernych, Eskridge, 1995,

факт присутствия облачности в интервале высот H определяется одновременным выполнением условий $T''(H) > 0$ & $R''(H) < 0$. Выбор одной из четырех градаций облачного балла p_0 в каждом ярусе осуществляется по дефициту точки росы и температуре облачного слоя по известной диаграмме Е. Н. Арабей. Внутри каждой градации p_0 разыгрывается случайным образом по бимодальному распределению для сферического квадрата $0.5^\circ \times 0.5^\circ$.

Созданная БД позволяет моделировать до трех облачных ярусов. Пространственная структура разорванной облачности представляется в виде случайной реализации гауссовского поля, ограниченной снизу. В верхнем ярусе (свыше 6 км) может задаваться перистая облачность в виде плоско-параллельного горизонтального слоя. Микрофизические и оптические параметры облаков определяются по регрессионным формулам в зависимости от влажности и температуры.

Проведенная проверка показала, что оценки различных облачных параметров, получаемые на выходе разработанной БД, находятся в удовлетворительном согласии со статистическими оценками, представленными в литературе и Интернете. Например, в таблице 1 показаны результаты сопоставления общего балла облачности в различных районах земного шара из созданной БД с пятью независимыми базами данных.

Таблица 1 - Сравнение среднегодовых баллов облачности по различным БД

Источник	Европа		Юго-Вост. Азия	Северная Америка	Южная Америка	Австралия
	Восточная	Западная				
Справочник «Облака и облачная атмосфера», 1989	4.5	-	-	4.8	5.4	3.6
TOVS, 1988	3.8	4.4	4.2	3.6	4.4	2.7
Geos-1, 1988	6.4	4.6	5.2	5.0	6.4	3.8
ISCCP C2, 1988	5.3	6.0	5.8	5.5	6.2	4.4
ISCCP D2, 1989	6.6	6.2	6.6	6.4	6.7	5.6
Среднее	5.3	5.2	5.4	5.1	5.8	4.2
БД	5.4	4.8	5.0	4.7	4.6	4.3

Как видно, для большинства районов земного шара балл облачности из разработанной БД близок к среднему баллу по остальным источникам. В большинстве случаев разница не превосходит 0.5 балла и в любом случае не выходит за пределы диапазона разброса сравниваемых величин.

В разделе 1.2 рассмотрена методика моделирования геометрической структуры разорванной облачности, разработанная под руководством автора совместно с В.В. Голомолзиным. Математическая модель разорванной облачности строится на основе стационарного нормального эргодического поля $Z(\mathbf{r})$, $\mathbf{r} = \{x, y\}$, изотропного в плоскости OXY со средней высотой z_0 и ограниченного снизу на уровне h_0 . В качестве исходных данных модели используются: балл облачности в зените p_0 ; средний диаметр основания облаков $\bar{D}$ и коэффициент формы $k_f = \bar{H}/\bar{D}$, где $\bar{H}$ - средняя толщина облаков.

Определяя область задания поверхности условиями $0 < x < L$, $0 < y < L$, где $L \gg \bar{D}$, можно записать выражение для $Z(x, y)$ в виде ряда Фурье

$$Z(x, y) = z_0 + \sum_m \sum_n P_{m,n} \exp[i(\frac{2\pi m}{L}x + \frac{2\pi n}{L}y)], \quad (1)$$

где $p = \frac{2\pi m}{L}$, $q = \frac{2\pi n}{L}$, m, n – целые числа; коэффициенты которых $P_{m,n}$ являются независимыми случайными комплексными числами.

Дисперсии коэффициентов $P_{m,n}$ определяются по формуле

$$\sigma_{m,n}^2 = \left(\frac{2\pi}{L}\right)^2 \frac{1}{4} W\left(\frac{2\pi m}{L}, \frac{2\pi n}{L}\right). \quad (2)$$

и удовлетворяют равенству $\sigma_z^2 = \sum_m \sum_n \sigma_{m,n}^2$, где σ_z^2 – дисперсия поля.

Функция $W(p, q)$ есть преобразование Фурье от нормированной корреляционной функции $\eta(\rho_x, \rho_y)$:

$$W(p, q) = \frac{\sigma^2}{\pi^2} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \eta(\rho_x, \rho_y) \exp(-ip\rho_x - iq\rho_y) d\rho_x d\rho_y, \quad (3)$$

где ρ_x, ρ_y – компоненты вектора расстояния между двумя точками поля.

Обозначим $\beta = \frac{h_0}{\sigma_z}$. Тогда в силу предположения об изотропности поля корреляционная функция $\eta(\rho)$ зависит только от расстояния. Как показано В.Тихоновым и В.Хименко, средний горизонтальный размер $\bar{l}$ превышения заданного уровня h_0 стационарным случайным процессом равен

$$\bar{l} = \frac{2\pi}{\sqrt{-\eta''(0)}} [1 - \Phi(\beta)] \exp\left(\frac{\beta^2}{2}\right), \quad (4)$$

где $\eta''(0)$ – вторая производная нормированной корреляционной функции при $\rho=0$, $\Phi(\beta)$ – интеграл вероятности.

В рассматриваемом случае $\bar{l}$ соответствует средней длине хорд облачных оснований вдоль произвольной прямой. Решая (4) относительно $\eta''(0)$ с учетом приближенного равенства $\bar{l} \approx \pi\bar{D}/4$, получим выражение:

$$-\eta''(0) = \left[\frac{8}{\bar{D}} n_0 \exp\left(\frac{\beta^2}{2}\right) \right]^2, \quad (5)$$

которое можно использовать в дальнейшем для нахождения параметров $\eta(\rho)$.

Определим среднее значение превышения $\bar{h}$ точками поля уровня h_0 :

$$\bar{h} = (1/n_0) \int_{h_0}^{\infty} (1/\sqrt{2\pi}) \exp(-z/\sigma_z^2) (z - h) dz. \quad (6)$$

Будем считать, что $\bar{h} \approx \bar{H}/2$. Тогда $\sigma_z = \sqrt{\pi/2} k_f D n_0 / [\exp(-\beta^2/2) - \sqrt{2\pi} \beta n_0]$.

В качестве нормированной корреляционной функции $\eta(\rho)$ выберем зависимость $\eta(\rho) = \exp(-\alpha\rho^2)$, где α – постоянный коэффициент, для которой $\eta''(0)$ конечна и отрицательна, и обеспечивается существование $\bar{D}$.

Для выбранного вида корреляционной функции

$$W(p, q) = \frac{\sigma_z^2}{\pi\alpha} \exp\left(-\frac{p^2}{4\alpha}\right) \exp\left(-\frac{q^2}{4\alpha}\right), \quad (7)$$

с учетом выражения для β получим

$$\alpha = 32 \frac{n_0^2}{\bar{D}} \exp(\beta^2). \quad (8)$$

Таким образом, определены все необходимые параметры для построения конкретных облачных реализаций. На рисунке 1 в качестве примера показан типичный фрагмент облачного поля.

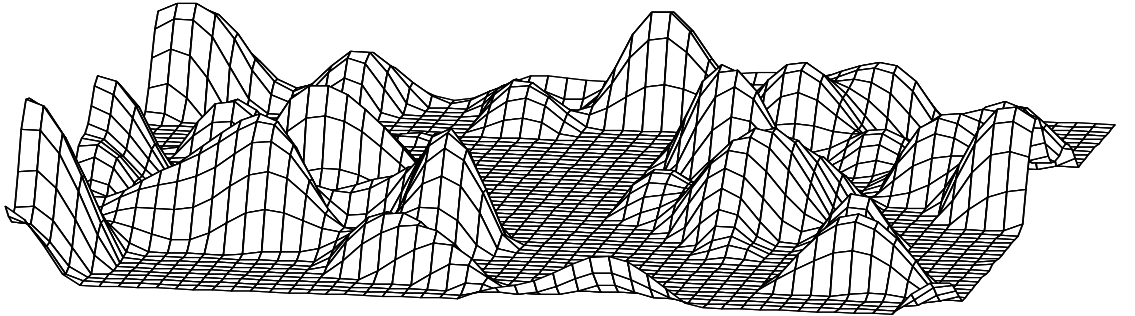


Рисунок 1 - Фрагмент случайного облачного поля

В облаках, т.е. в точках пространства, координаты $\{x, y, z\}$ которых удовлетворяют условию $H_{н.г.} < z < Z(x, y)$, оптические характеристики среды (индикатриса, коэффициенты рассеяния и ослабления) задавались по модели «широкого» распределения капельных облаков, предложенной Е. М. Фейгельсон.

Особенностям вычисления оптических характеристик аэрозолей и облаков посвящен раздел 1.3. Для их вычислений был разработан специальный алгоритм [Рублев, 1994; Jacquinet-Husson et al, 2005, 2008] на основе теории Ми, который обеспечивает контроль точности расчета индикатрис для всех заданных углов рассеяния. В выполненных массовых расчетах относительная ошибка вычисления значений индикатрис для любого угла не превышает 0.3%. Кроме использования в БД по атмосферным моделям, полученный массив расчетных данных применяется для определения оптических характеристик более сложных, композиционных моделей.

При вычислении оптических параметров ледяных облаков кристаллы льда представлялись в качестве гексагональных призм. Для вычислений был разработан специальный алгоритм, основанный на теории Ми с использованием эффективного радиуса R_e . Для нахождения R_e использовалась интерполяция $R_e = R_V + f(R_V | m-1|) (R_P - R_V)$, где R_P , R_V – радиусы сфер, имеющие одинаковые с призмой поверхность и объем, m – комплексный коэффициент преломления льда. Два параметра a , b логистической функции $f(x) = \frac{1}{1 + a \cdot \exp(-b \cdot x)}$ определялись подгонкой по имеющимся в литературе данным точных расчетов рассеяния электромагнитной волны на гексагональной призме. Проверка такой схемы по всем опубликованным результатам точных расчетов, включая расчеты факторов коэффициентов экстинкции и средних косинусов, показала хорошее совпадение.

Моделирование изменчивости содержания малых газов проводится (раздел 1.4) умножением вертикального климатического профиля концентрации газа на множитель $\eta = 1 + \alpha$, где α – случайное число, распределенное по нормальному закону с нулевым средним и среднеквадратическим отклонением $\sigma = 0.05$ для CO_2 и 0.25 – для остальных газов (O_3 , CH_4 , и т.д.).

В разделе 1.4 описан также порядок моделирования изменчивости отражательных или излучательных свойств поверхности. Моделирование проводилось с помощью глобальной цифровой карты свойств земной поверхности с разрешением $10' \times 10'$, созданной в NASA Langly Research Center. Для учета сезонных изменений излучательной способности на эту карту накладывались климатические данные о границе снежного покрова. Таким образом были получены 12 месячных глобальных карт стационарных типов земной поверхности с наложенными на них снежными масками. На каждой из 12 месячных глобальных карт земной поверхности были выделены 72 координатные области ($20^\circ \times 20^\circ$), охватывающие поверхность суши и прилегающего океана. Во всех областях были вычислены частоты встречаемости различных типов поверхности суши. По этим частотам каждому профилю NOAA-88/89 и построенной на его основе атмосферной модели при наличии признака *Land* случайным образом приписывается определенный тип суши, который в дальнейшем используется при моделировании радиационного переноса. Вода, в качестве подстилающей поверхности, приписывается профилю радиозондовых измерений при наличии признака *Sea*.

Во второй главе дается описание алгоритмов метода Монте-Карло, разработанных для вычисления характеристик солнечного излучения (СИ) и собственного излучения атмосферы и подстилающей поверхности (ИАП). Описание двух трехмерных алгоритмов KIAE1 и KIAE2 для расчета интенсивностей и потоков СИ приведено в разделе 2.1.

Алгоритм KIAE1 основан на прямом моделировании траекторий фотонов. Каждая траектория начинается на верхней границе атмосферы, и начальный вес фотона $Q_0 = S_\lambda \cos \theta_0$, где S_λ – солнечная постоянная, θ_0 – зенитный угол Солнца. Другие горизонтальные координаты начальной точки имеют равномерное распределение в $L \times L$. Потоки рассчитываются для каждого пикселя, когда фотон пересекает его верхнюю или нижнюю границу. Интенсивность отраженного в зените или нисходящего в надире излучения определяется отношением суммарного вклада фотонов, траектория которых пересекает поверхность под

зенитным углом не более заданного α , к телесному углу $\Omega = 2\pi(1-\cos \alpha)$. В расчетах принималось $\alpha=10^\circ$.

Второй алгоритм KIAE2 предназначен только для расчета интенсивностей. Он основан на сопряженном уравнении переноса. Траектории фотона моделируются в противоположенном направлении, т.е. из «приемника» (верхняя или нижняя граница пикселя, для которой оценивается интенсивность) в «источник» (в направлении на Солнце). В общем случае интенсивность I определяется как математическое ожидание

$$I = \left\langle \sum_{n=0}^N Q_n g(\mu) \omega_0 \exp(-\tau_n) \right\rangle, \quad (9)$$

где $n = 0 \dots N$ – число столкновений с частицами атмосферы или подстилающей поверхности для заданной траектории, Q_n – весовой множитель учета энергетической ценности фотонов; $g(\mu)$ – фазовая функция рассеяния или отражения поверхности, μ – косинус угла рассеяния или отражения; ω_0 – альбедо однократного рассеяния или альбедо поверхности; τ_n – суммарная оптическая толщина между точкой рассеяния (отражения) и верхней границей атмосферы вдоль направления солнечного луча. При попадании фотона в облачный слой длина свободного пробега фотона моделируется на основании известного метода «максимального сечения».

Оба алгоритма KIAE1 и KIAE2 участвовали в международном сравнении трехмерных радиационных кодов I3RC [Cahalan et al., 2005], проводившемся с использованием реальных полей однослойной облачности, и показали хорошую вычислительную эффективность и точность. Подобные расчеты полей яркости методом МК требуют много времени при больших значениях облачного коэффициента рассеяния. В этих случаях, когда длина пробега фотона в облаке в 2-3 раза меньше шага сетки d , на которой задана модель облачного поля, моделирование движения фотона можно осуществлять с постоянным шагом $l \approx 0.5d$ до попадания в облако. Это дает примерно двойной выигрыш в скорости вычислений и почти не влияет на смещение оценок характеристик СИ.

В разделе 2.2 приводится описание методики вычисления интегральных в области спектра $\Delta\lambda = 0.2 \div 5.0$ мкм потоков нисходящего и восходящего СИ, позволяющей учитывать спектры поглощения атмосферных газов. Кроме селективного газового поглощения она учитывает рассеяние и поглощение на аэрозолях, релеевское рассеяние и спектральный ход альбедо подстилающей поверхности. Интегральные потоки F рассчитываются как суммы $F = \sum_k F_k$, где

F_k – интегральный поток СИ в спектральном интервале $\Delta\lambda_k \ll \Delta\lambda$. В свою очередь

$$F_k = \int_{\Delta\lambda_k} F_\lambda d\lambda \quad (10)$$

При аналоговом моделировании методом МК спектральные потоки F_λ для заданного уровня на высоте z определяются в виде математических ожиданий

$$F_\lambda = \left\langle \sum_{n=0}^N Q_n \cdot \exp(-\tau_a) \Delta_z \right\rangle, \quad (11)$$

где τ_a – суммарная оптическая толщина газов τ_a , определяемая для данной модели атмосферы длиной волны λ , накопленная вдоль траектории фотона; Δ_z – индикатор, принимающий значение 1, если фотон пересекает контрольный уровень z , например, снизу вверх для восходящего излучения, и 0 – если нет.

Учет селективного газового поглощения осуществляется по закону Бугера. Для устранения высокочастотных осцилляций, обусловленных резким спектральным ходом газовых коэффициентов поглощения, в (11) проводится сглаживание рассчитываемых спектральных потоков F_λ в узком частотном интервале $\Delta\nu = 10 \text{ см}^{-1}$ с центром на длине волны λ . Сглаживание происходит за счет розыгрыша нескольких тысяч фотонов, частоты которых равномерно распределены на $\Delta\nu$ и выбираются независимо друг от друга. Случайный выбор частоты фотонов позволяет одновременно проводить методом МК пространственное и спектральное интегрирование при вычислении потоков или интенсивностей, что в 30-80 раз повышает скорость алгоритмов.

Коэффициенты газового поглощения, используемые в (11), предварительно рассчитываются на различных высотах атмосферы полинейным (line-by-line) методом. Для вычисления коэффициентов газового поглощения использовались

процедуры, разработанные Б. А. Фоминым и А. Н. Троценко на базе атласа HITRAN-92, А. Н. Троценко (HITRAN-96, 2000) и американской корпорацией Atmospheric and Environmental Research (HITRAN-2004, 2008).

В разделе 2.3 представлены методика и результаты расчетов характеристик уходящего солнечного излучения для определения коэффициентов анизотропии K_a уходящего СИ применительно к задаче оценивания радиационного баланса Земли (РБЗ) по спутниковым данным. Определение РБЗ осуществляется пересчетом интенсивностей оптического излучения, приходящего на светоприемное устройство (СПУ) спутникового радиометра, в полусферические потоки на верхней границе атмосферы на основе ламбертовой зависимости. В эту зависимость вводятся поправочные коэффициенты K_a , учитывающие угловую анизотропию уходящего излучения.

Интегрирование по спектру осуществляется в соответствии с разделом 2.2. Вычисления спектральных характеристик уходящего СИ при расчете потоков и при расчете интенсивностей, основаны на моделировании сопряженных траекторий в условиях сферической модели атмосферы. Начальная точка этих траекторий лежит на внешней границе атмосферы. При расчете потоков первый отрезок сопряженной траектории ориентирован на центр пикселя с координатами $r_p = \{R_z, 0, 0\}$, где R_z – радиус Земли, а начальная точка $r_0 = \{x_0, y_0, z_0\}$ выбирается так, чтобы вектор $r_p - r_0$ имел изотропное распределение относительно центра пикселя. При расчете интенсивности первый отрезок сопряженных траекторий принадлежит плоскости нулевого вертикала. Его направление $w_0 = (-\cos\theta, -\sin\theta, 0)$ противоположно направлению, в котором рассчитывается интенсивность для зенитного угла наблюдения θ .

При столкновениях фотона с частицами атмосферы или подстилающей поверхности одновременно для различных зенитных θ_{0i} , а при расчете интенсивностей и для азимутальных углов φ_j Солнца, направление на которое определяется векторами $w_{ij} = \{\cos\theta_{0i}\cos\varphi_j, \sin\theta_{0i}\cos\varphi_j, \sin\varphi_j\}$, рассчитываются веса

$$\psi(x_n) = \frac{g(\mu_{i,j})}{2} \omega_0 \cdot \exp[-\tau_t(r_n, w_{i,j}) - \tau_a], \quad (12)$$

где $g(\mu)$ – индикатриса рассеяния или отражения; μ – косинус угла между направлением движения фотона до столкновения и w_{ij} ; ω_0 – в зависимости от типа столкновения – вероятность выживания фотона, альbedo поверхности или

единица (для случая релеевского рассеяния); $\tau_t(r_n, w_{ij})$ – суммарная оптическая толщина, разделяющая точку r_n и внешнюю границу атмосферы в направлении w_{ij} ; τ_a – оптическая толщина газового поглощения, накопленная вдоль траектории фотона.

На рисунке 2 показаны результаты расчетов коэффициентов анизотропии для различных сцен. Для снега (а) наблюдается малая зависимость K_a от угловых координат и минимальное, по сравнению с другими типами поверхности, отклонение от единицы. Максимальное отклонение от ламбертовской зависимости имеет место для водной поверхности (б) с низкими значениями альбедо. Наличие облачности (в, г), независимо от типа подстилающей поверхности, приводит к увеличению анизотропии уходящего излучения.

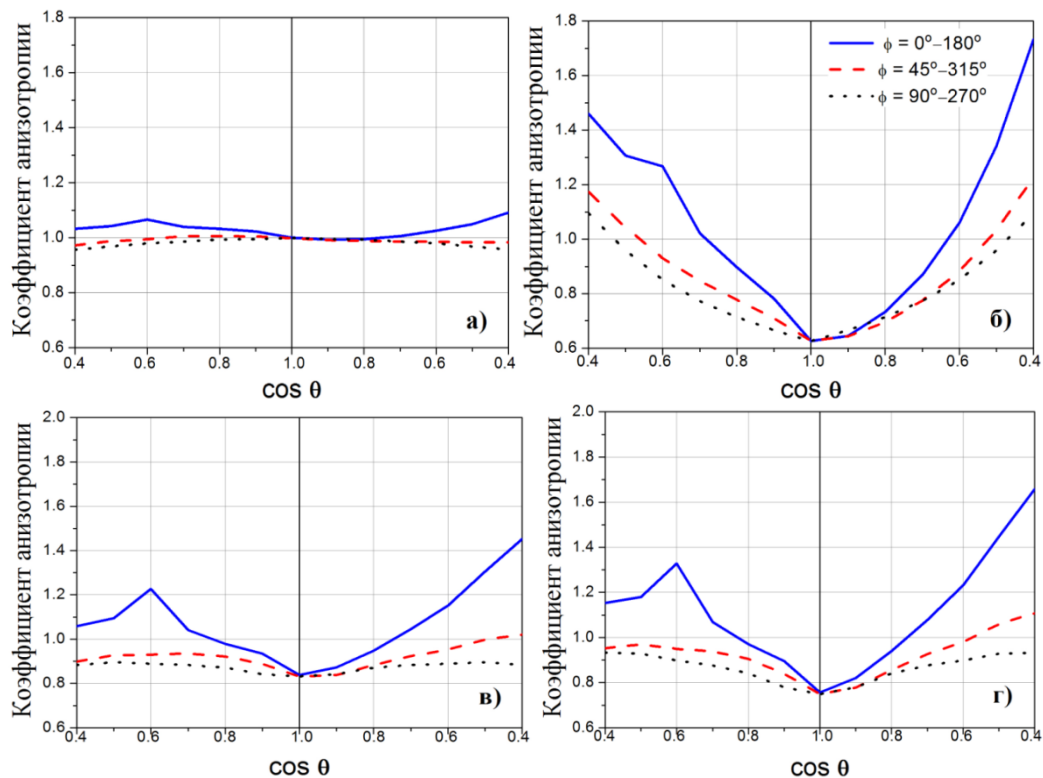


Рисунок 2 - Угловые распределения коэффициентов анизотропии при различных типах подстилающей поверхности: а) снег; б) вода; в) облачность над снегом; г) облачность над водой; $\cos \theta_0 = 0.6$

Небольшое изменение алгоритмов при задании начальных распределений фотонов позволило получать оценки интенсивностей и потоков нисходящего СИ на поверхности Земли для моделирования различных актинометрических измерений. В частности, при расчете потоков начальная точка $r_0 = \{R_z, 0, 0\}$ выбирается на поверхности Земли, а направление сопряженной траектории

моделируется по закону Ламберта. Весь остальной алгоритм, включая расчет вклада точки столкновения по (13), остался без изменений.

Раздел 2.4 дает описание трехмерного алгоритма МК для расчета интенсивности собственного излучения в каналах ИК-зондировщиков, основанного на моделировании сопряженных траекторий фотонов. Алгоритм предназначен для расчета аподизированных значений интенсивностей и якобианов уходящего излучения в каналах ИК-зондировщиков высокого спектрального разрешения типа IASI (европейский метеоспутник «Метор») и ИКФС-2 (российский метеоспутник «Метеор-М» №2). Моделирование сопряженных траекторий начинается на внешней границе атмосферы в направлении оси СПУ, а заканчивается при поглощении фотона в атмосфере, на поверхности или при его уходе в космос через верхнюю границу атмосферы. Координаты стартовой точки равномерно распределены в пределах квадрата со стороной $L = 50$ км.

Интенсивность уходящего излучения I рассчитывается как математическое ожидание энергетических вкладов W фотонов для всех смоделированных траекторий $I = \langle \Delta \cdot W \rangle$, индикатор Δ принимает значение 1 или 0 в зависимости от того, произошло поглощение фотона или нет. Энергетический вклад фотона W с частотой ν в интенсивность I определяется функцией Планка $B(\nu, T)$, т.е. $W = B(\nu, T)$ при поглощении в атмосфере с температурой T в точке поглощения или $W = \epsilon B(\nu, T_s)$ при поглощении на поверхности со спектральной излучательной способностью ϵ и температурой T_s .

Вариационные производные (якобианы) по температуре, усредненные в заданном атмосферном слое, определяются с использованием формулы Лагранжа как математические ожидания

$$J_i^T = \frac{\delta I_i}{\delta T} = \left\langle \Delta_i \cdot \frac{\Delta B(T)}{\Delta T} \cdot \left(1 + \frac{\Delta k_g}{k_\Sigma} \right) \right\rangle, \quad (13)$$

где Δ_i – индикатор, единичное значение которого указывает, что поглощение произошло именно в атмосферном слое $z_{i-1} \div z_i$; ΔT – конечное приращение по

температуре и соответствующие ему смещение функции Планка $\Delta B(T)$ и суммарного газового коэффициента Δk_g ; k_Σ – суммарный коэффициент поглощения атмосферы в точке обрыва траектории фотона. Аналогично усреднением по всем поглощенным подстилающей поверхностью фотонов определяется якобиан J_S^T по температуре поверхности T_s

$$J_S^T = \frac{\delta I_0}{\delta T} = \left\langle \Delta_0 \cdot \frac{\Delta B(T_s)}{\Delta T} \right\rangle. \quad (14)$$

Полученные спектры (в терминах яркостных температур) и температурные якобианы в условиях кучевой облачности показаны на рисунке 3.

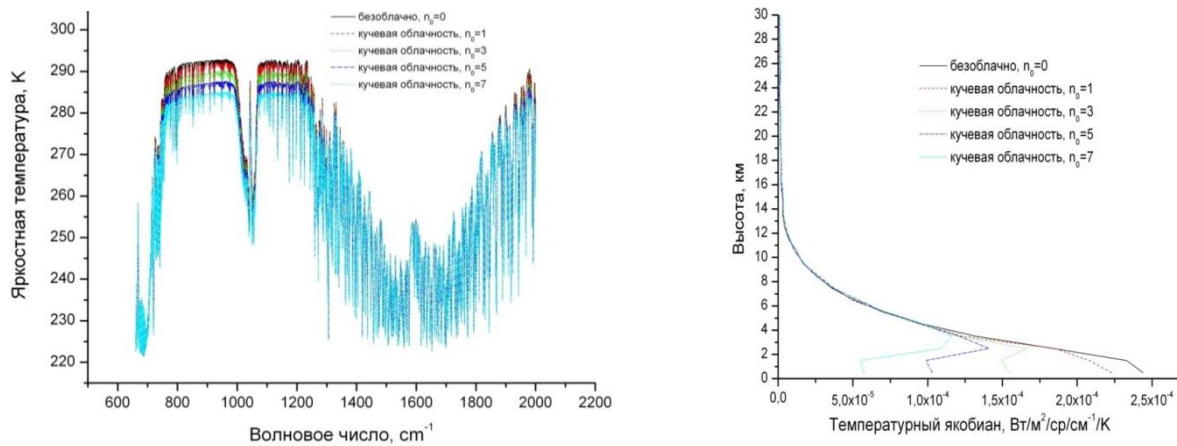


Рисунок 3 - Яркостные температуры в каналах ИКФС-2 (а) и температурный якобиан (б) при различных баллах кучевой облачности, летняя модель атмосферы

Для расчета якобианов по относительным изменениям концентраций газов также используется метод зависимых испытаний. На его основе получено выражение

$$J_{m,j}^q = \frac{\delta I_{m,j}}{\delta \ln(q_{m,j})} = \frac{1}{\alpha} \left\langle \Delta \cdot B(T) \cdot \left[\left(1 + \alpha \frac{k_{m,j}}{k_{m,\Sigma}} \cdot \Delta_m \right) \cdot \exp(-\alpha \cdot k_{m,j} \cdot l_{m,\Sigma}) - 1 \right] \right\rangle, \quad (15)$$

где $q_{m,j}$ – доля молекул j -газа в m -слое атмосферы; α – относительное приращение концентраций газов (в расчетах $\alpha = 0.1$); $k_{m,j}$ – коэффициент поглощения j -газа, $k_{m,\Sigma}$ – суммарный коэффициент поглощения; $l_{m,\Sigma}$ – накопленная геометрическая длина пробега фотона в m -слое атмосферы.

Для иллюстрации правильности вычисления якобианов по концентрациям в таблице 2 для 3 волновых чисел при различных значениях α представлены результаты проверки согласия яркостных температур T_{B0} , полученных

Таблица 2 - Сравнение изменения оценок яркостных T_B температур уходящего излучения при увеличении относительного содержания атмосферных газов

межд	660 см^{-1}			1211.5 см^{-1}			1230.0 см^{-1}		
$\alpha, \%$	T_{B0}	T_{Br}	ΔT_B	T_{B0}	T_{Br}	ΔT_B	T_{B0}	T_{Br}	ΔT_B
0	226.22	226.22	0.00	275.38	275.38	0.00	285.50	285.50	0.00
10	226.65	226.63	0.02	274.62	274.70	-0.08	284.81	284.53	0.28
20	227.04	227.05	-0.01	273.96	274.01	-0.05	284.16	283.57	0.59
30	227.41	227.46	-0.05	273.28	273.32	-0.04	283.52	282.58	0.94

прямыми расчетами, с их оценками T_{Br} на основе линейных приближений Лагранжа. Для всех представленных волновых чисел наблюдается согласие между T_{B0} и T_{Br} в пределах измерительной погрешности, если изменчивость концентраций поглощающих газов составляет менее 10%. При этом следует учитывать, что, кроме ошибок в определении якобианов, основной причиной расхождений может быть нелинейная зависимость T_{B0} от концентраций газов. На это указывает увеличение ΔT_B с ростом α для волнового числа 1230.0 см^{-1} . При использовании температурных якобианов разность между яркостными температурами, полученными прямыми расчетами, и их оценками в десятки раз меньше, чем диапазон изменчивости самих T_{B0} .

Для учета рассеяния собственного излучения тонкими облачными или пылевыми слоями в быстрых радиационных моделях (БРМ) измерений ИК-зондировщиков разработана специальная методика. Описание и валидация методики на основе сопоставления с точными расчетами дается в разделе 2.5. Программная реализация методики представляет процедуру, которая не замедляет скорость БРМ и совместима с ними по используемым данным.

Глава 3 посвящена сопоставлению рассчитанных и измеренных потоков солнечного излучения на поверхности Земли. В разделе 3.1 проводится сравнение результатов расчетов с данными наземных радиационных измерений в метеорологической обсерватории (МО) МГУ (1995 и 1996 гг.) и в американском радиационном эксперименте ARESE (Оклахома, 1994 и 1995 гг.). Сравнение рассчитанных и измеренных потоков проводилось для безоблачной атмосферы. Для вычисления интегральных потоков СИ использовалась методика разыгрывания сопряженных траекторий фотонов методом МК в условиях

сферической модели атмосферы. Максимальная общая погрешность расчетов оценена в $2 \div 3 \text{ Вт/м}^2$ при определении потоков и в $3 \div 4 \text{ Вт/м}^2$ – при оценках поглощения СИ атмосферой. При оценках среднесуточных радиационных характеристик погрешность не превышает 1 Вт/м^2 .

Известная модель MLS-лето средних широт из (WCP-112, 1986) использовалась в качестве опорной. Изменения общего содержания водяного пара или озона проводились умножением профиля массовой концентрации газа на постоянное число. Оптические толщины τ_0 аэрозоля во всей атмосфере варьировались за счет изменения его содержания в приземном $0 \div 2 \text{ км}$ слое. В качестве подстилающей поверхности рассматривался травяной покров.

В МО МГУ аэрозольная оптическая толщина (АОТ), являющаяся входным параметром расчетов, определялась по данным измерений прямого СИ, поэтому для сравнений рассматривались независимо определяемые в расчетах и измерениях потоки рассеянного СИ. Доверительные интервалы для результатов измерений (из-за аппаратных ошибок) и расчетов (из-за неточности исходных данных) потоков рассеянного СИ для 1996 г. представлены на рисунке 4. Разница в результатах незначима, за исключением двух дней, когда не было ветра и в атмосфере происходило накопление антропогенных загрязнений.

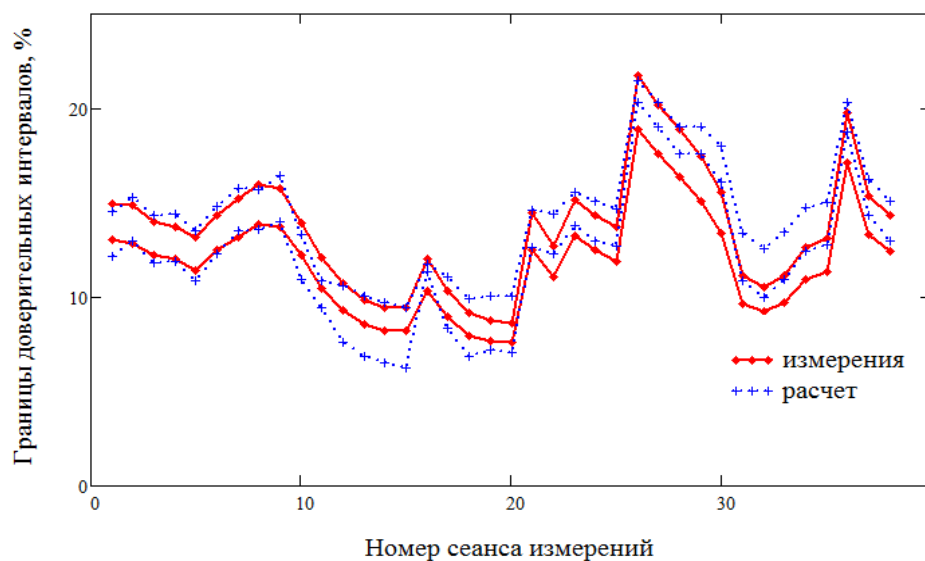


Рисунок 4 - Сравнение расчетов потоков рассеянного СИ с измерениями МО МГУ

Во время проведения американского эксперимента в Оклахоме была возможность за счет использования параллельных независимых оценок

параметров атмосферы сравнить результаты расчетов с измерениями всех компонент СИ: прямой, рассеянной и суммарной. На рисунке 5 приведены результаты расчетов и измерений потоков прямого и рассеянного СИ для отдельных сеансов. Сравнение показывает, что они совпадают в пределах $1 \div 2\%$.

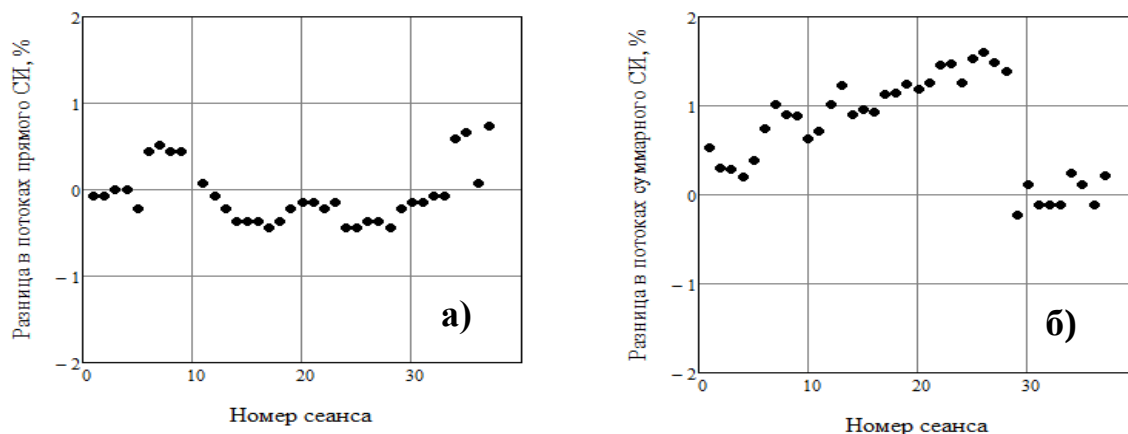


Рисунок 5 - Сравнение расчетов потоков прямого (а) и суммарного СИ (б) с измерениями на станции SGP (Оклахома)

Результаты дополнительной проверки работоспособности методики вычисления интегральных солнечных потоков на станциях ARM – американской программы по измерениям атмосферной радиации – изложены в разделе 3.2. Для сравнений снова использовались экспериментальные данные со станции SGP, Оклахома, но за 1997 год, и двух других станций: в районе экватора на острове Науру и на северном побережье Аляски в Барроу. Как и ранее, результаты расчетов удовлетворительно согласуются с данными измерений для всех трех станций ARM. Для прямых потоков средние отклонения между измерениями и расчетами находились в пределах от 0.0% (Оклахома) до 1.6% (Науру), среднеквадратические – от 0.2% (Оклахома) до 0.5% (Барроу). Минимальное среднее отклонение по рассеянным потокам было также в Оклахоме – 0.5%. Максимальное в Барроу – 1.4%.

С использованием разработанной методики были получены оценки среднесуточного солнечного поглощения Q_{abs} в атмосфере относительно потока СИ, падающего на внешнюю границу атмосферы. В зависимости от выбранного дня года и аэрозольной загрузки $Q_{abs} = 0.23 \div 0.27$, т.е. совпадает со значением $Q_{abs} = 0.25$, приведенным А. Аркингом на основе усреднения наземных и спутниковых данных. Фактически, эта же величина была подтверждена в

результате использования трехмерного алгоритма метода МК. С его помощью была проведена серия расчетов для выборки атмосферных моделей из созданной БД с различными формами облачности для диапазона широт 30° - 60° с.ш. С ростом балла облачности усредненное по его грациям Q_{abs} менялось от 0.24 до 0.25. Таким образом, полностью подтверждается тезис о том, что источником «аномального облачного поглощения», упомянутого во введении автореферата, является неточная параметризация радиационного переноса в моделях изменения климата или прогноза погоды.

В разделе 3.3 разработана методика сопоставления результатов измерений и расчетов потоков нисходящего СИ в условиях разорванной облачности. На основе моделирования распределения потоков СИ на поверхности Земли оценены их радиусы корреляций. Показано, что на расстояниях более 5 км расчетные или экспериментальные оценки потоков рассеянного и суммарного СИ можно считать независимыми друг от друга. Бимодальный характер вероятностных распределений потоков в условиях разорванной облачности не позволяет однозначно связывать ширину доверительного интервала с величиной среднеквадратического отклонения, как это обычно делается при нормальном распределении.

Раздел 3.4 посвящен объяснению известного эффекта – появлению при небольших баллах облачности локального максимума $C_Q > 1$ относительного потока $C_Q = Q/Q_0$ на поверхности Земли, где Q и Q_0 – соответственно потоки СИ при наличии облаков и при безоблачном небе. Летом появление облаков над слабо отражающей поверхностью приводит к увеличению доли СИ, отраженного назад в космос, по сравнению с аналогичной долей в безоблачной атмосфере. Парадоксальность данного эффекта заключается в том, что одновременное с этим возрастание суммарного СИ на поверхности Земли, т.е. появление статистически обеспеченных средних значений $C_Q > 1$ при прочих фиксированных параметрах атмосферы автоматически означало бы нарушение закона сохранения энергии. Как показано на основе математического моделирования условий реальных измерений под Москвой и в Оклахоме, причиной появления больших C_Q является

уменьшение АОТ атмосферы к моменту появления конвективной облачности. Это уменьшение, не учитываемое при вычислениях Q_0 по регрессионной зависимости от зенитного угла Солнца, полученной при ясном небе, приводит к возрастанию потока СИ на поверхности Земли и соответствующему снижению потока уходящего в космос СИ, которое не компенсируется дополнительным отражением от облачности при малых баллах.

В **главе 4** представлены методики и результаты определения параметров облачной атмосферы по измерениям из космоса. В разделе 4.1 дается описание методики определения оптической толщины τ_{cl} слоистой облачности по данным спутникового многоканального радиометра AVHRR, установленного на оперативных полярно-орбитальных спутниках NOAA. Полученные автором оценки τ_{cl} использовались для вычисления параметров радиационного режима атмосферы во время комплексных натурных экспериментов на Звенигородской научной станции ИФА [Рублев и др., 1994; Golitsyn et al., 2000; Feigelson et al., 2001]. Оценки τ_{cl} , полученные из условия равенства интенсивности, измеренной спутниковым радиометром и рассчитанной методом МК, удовлетворительно совпали с оптическими толщинами, восстановленными сотрудниками ИФА и МО МГУ на основе наземных актинометрических измерений.

В разделе 4.2 приведена разработанная автором методика [Rublev et al., 1997; Rublev et al., 2001] для определения по данным AVHRR параметров облачной атмосферы, необходимых для вычисления потоков СИ. Методика основана на сочетании усредненных по площади спутниковых оценок балла облачности, ее среднего коэффициента ослабления, а также альbedo подстилающей поверхности с расчетными зависимостями угловых распределений интенсивности в первом канале AVHRR (580÷680 нм). Для получения расчетных значений интенсивности используется моделирование переноса СИ трехмерным алгоритмом метода МК при модельных полях кучевых облаков. Проверка работоспособности методики проводилась на основе сопоставления расчетов

потоков УФ-радиации по данным 18 сеансов измерений AVHRR над Москвой с результатами измерений, проводимых в МО МГУ.

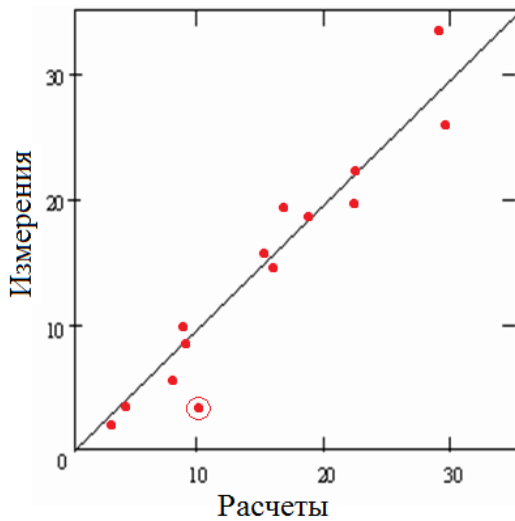


Рисунок 7 - Сравнение расчетов УФ потоков, Вт/м², с измерениями при различных баллах облачности

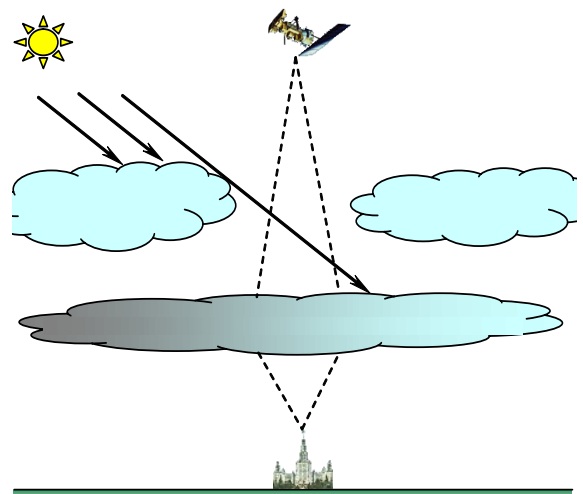


Рисунок 8 - Геометрическая схема появления грубых ошибок

Как видно из рисунка 7, в целом наблюдается удовлетворительное согласие измеренных и рассчитанных значений потоков. Вместе с тем, для реальных облачных ситуаций, формально совпадающих по баллу с модельными, но резко отличающихся от них по пространственной структуре, может наблюдаться значительное расхождение (на рисунке 7 соответствующая точка выделена окружностью). Пример такой ситуации показан на рисунке 8, когда в поле зрения радиометра попадает облачность, затененная верхним слоем.

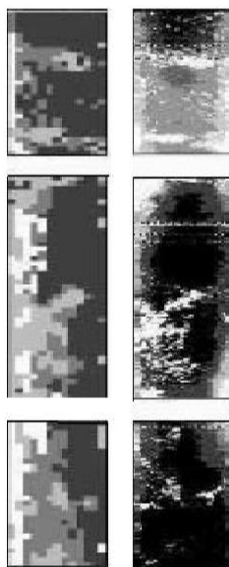
Одним из направлений исследований автора [Рублев и др., 2004; Rublev, Uspensky, et al., 2009] являлась разработка способа и алгоритма детектирования облаков применительно к измерениям ИК-зондировщика IASI. Она изложена в разделе 4.3. Алгоритм использует процедуру классификации облачности по максимуму функции апостериорной плотности вероятности $f(\omega_k | \mathbf{R})$, где ω_k – заранее выбранный класс облачности с порядковым номером k ; $\mathbf{R}$ – вектор измеренных яркостных температур в отобранных для решения данной задачи N каналах IASI. Ключевым моментом для реализации процедуры является получение априорных функций вероятности $f_{ap}(\mathbf{R} | \omega_i)$. Для математического описания функции $f_{ap}(\mathbf{R} | \omega_i)$ использовался многомерный нормальный закон. Параметры закона определялись статистической обработкой распределений векторов $\mathbf{R}$, полученных трехмерным методом МК для обучающих выборок из

БД по атмосферным моделям. В зависимости от общего балла n_0 выделено 5 классов облачности: ω_1 – безоблачно ($n_0 = 0$); ω_2 – легкая облачность ($0.00 < n_0 < 0.25$); ω_3 – средняя облачность ($0.25 < n_0 < 0.65$); ω_4 – преимущественная облачность ($0.65 < n_0 < 0.95$); ω_5 – сплошная облачность ($n_0 > 0.95$). Пример проверки эффективности разработанной облачной классификации представлен в таблице 3, где полужирным шрифтом выделены диагональные элементы матриц - вероятности правильной классификации.

Таблица 3 - Вероятности облачной классификации для тропиков

Выборка	Облачный класс	Модельный (истина)				
	Диагностика	ω_1	ω_2	ω_3	ω_4	ω_5
Обучающая (80% от общего размера)	ω_1	85	0	0	0	2
	ω_2	4	70	8	0	20
	ω_3	0	6	49	8	11
	ω_4	1	1	18	85	22
	ω_5	10	22	24	6	45
Контрольная (20% от общего размера)	ω_1	88	0	0	0	4
	ω_2	4	63	8	0	21
	ω_3	0	9	51	3	13
	ω_4	2	0	19	91	20
	ω_5	6	28	22	6	42

В разделе 4.4 рассмотрены результаты валидации созданного алгоритма. Использовались натурные измерения аналога IASI – самолетного ИК-зондировщика NAST-I, разработанного в Массачусетском технологическом институте. Валидация проводилась сравнением параметров облачности, определяемых по спектрам NAST-I (с пространственным разрешением $h \approx 4.3$ км), со снимками сканера MAMS (Multispectral Atmospheric Mapping Sensor), с $h \approx 100$ м. Оба прибора были установлены на борту высотного самолета ER-2, выполнявшего полеты на высоте ~ 20 км.



На рисунке 9 представлены результаты детектирования облачности по данным NAST-I (а) и MAMS (б). Пяти различным градациям балла облачности (от безоблачного неба к сплошной облачности) соответствует изменение цвета от черного к белому. Визуальное сопоставление показывает, что детектирование облачности по данным NAST-I достаточно хорошо воспроизводит особенности поля облаков, зафиксированные сканером MAMS с высоким пространственным разрешением.

Рисунок 9 - Детектирование облачности по спектральным измерениям NAST-I (слева) и сканера MAMS (справа)

Пятая глава диссертации посвящена разработке методик определения концентраций XCO_2 и потоков углекислого газа по спутниковым измерениям. В разделе 5.1 дается описание спутникового спектрометра SCIAMACHY и разработанного в университете Бремена (Германия) алгоритма восстановления концентраций малых газовых компонент WFM-DOAS (Weighting Function Modified Differential Optical Absorption Spectroscopy). В разделе 5.2 приведены результаты тестирования этого алгоритма, выполненного под руководством автора. Спутниковые оценки XCO_2 сравнивались с самолетными измерениями *in situ* над Сибирью. Абсолютное занижение спутниковых оценок XCO_2 по сравнению с самолетными измерениями составляло $10\div 20$ млн⁻¹. В холодный период года спутниковый алгоритм работает неустойчиво и дает сильно заниженные значения XCO_2 . Наиболее вероятной причиной этого является наличие снежного покрова. Показано, что для Сибири в поле зрения SCIAMACHY с вероятностью более 95% присутствует разорванная или тонкая облачность, пропущенная алгоритмом селекции безоблачных пикселей. Для повышения точности и уменьшения влияния облаков на точность алгоритма, определение XCO_2 следует проводить в специально отобранных рабочих каналах SCIAMACHY в полосах поглощения кислорода и углекислого газа. Кроме того, определение средней по высоте объемной концентрации как отношение количеств молекул CO_2 и O_2 требует использования измерений интенсивности уходящего СИ в двух (четвертом и шестом) независимых каналах SCIAMACHY. Следовательно, при разработке новых методик определения концентраций необходимо учитывать влияние ошибок калибровки каналов и временного хода калибровочных констант.

Описание такой методики, разработанной автором на основе моделирования измерений SCIAMACHY с помощью двух алгоритмов МК, дается в разделе 5.3. Методика основана на одновременном измерении спектральных коэффициентов отражения системы «подстилающая поверхность + атмосфера» в полосах поглощения кислорода (760 нм) и углекислого газа (1600 нм) в нескольких парах каналов, специально выбранных для каждой полосы. Критерием их выбора является примерное равенство диапазонов изменения относительных

оптических толщин поглощения O_2 и CO_2 , измеряемых в соответствующих парах каналов, или их линейных комбинаций при переходе от безоблачных условий к облачным. Приводится пример конкретного выбора пар каналов и показано, что в облачных условиях, включая случаи с кучевыми облаками, точность определения XCO_2 составляет $1 \div 2\%$ в зависимости от балла облачности и зенитного угла Солнца.

На основе математического моделирования невозможно учесть погрешности калибровок, которые имеют различный спектральный и временной ход для кислородных каналов в полосе 760 нм с кремниевым фотоприемником и CO_2 -каналов в полосе 1600 нм, где используется фотоприемник на основе антимолибдита индия. В связи с этим, разработанная методика была модифицирована (раздел 5.4) на основе подгонки оценок XCO_2 по реальным спектрам SCIAMACHY.

Оценка XCO_2 представлялась в виде линейной комбинации отношений оптических толщин: $XCO_2 = a_0 + \sum_i a_i \frac{\tau_i^{CO_2}}{\tau_i^{O_2}}$, где a_0 , a_i – постоянные коэффициенты.

Для уменьшения влияния погрешностей калибровки и ее временной нестабильности, непосредственный отбор пар каналов и нахождение соответствующих им коэффициентов a_i проводился по реальным самолетным измерениям XCO_2 над Сургутом в 2003 году. Проверка методики проводилась на независимых самолетных измерениях над Новосибирской областью в 2003 г. и над Сургутом в 2004-2007 годах. Для ее дополнительной валидации проводились сравнения с круглогодичными наземными измерениями американской лаборатории NOAA/ESRL (Earth System Research Laboratory) на вулкане Мауна-Лоа (высота 3400 м, Гавайи) в 2003 и 2007 годах. На рисунке 10 показаны результаты сравнения спутниковых оценок XCO_2 с данными опорных измерений.

Проверка разработанного метода полностью подтвердила его работоспособность в различных условиях. На основе сопоставлений с прецизионными самолетными и наземными измерениями показано, что оценка усредненной за месяц XCO_2 получается с точностью около 1% (или $3\text{-}4 \text{ млн}^{-1}$).

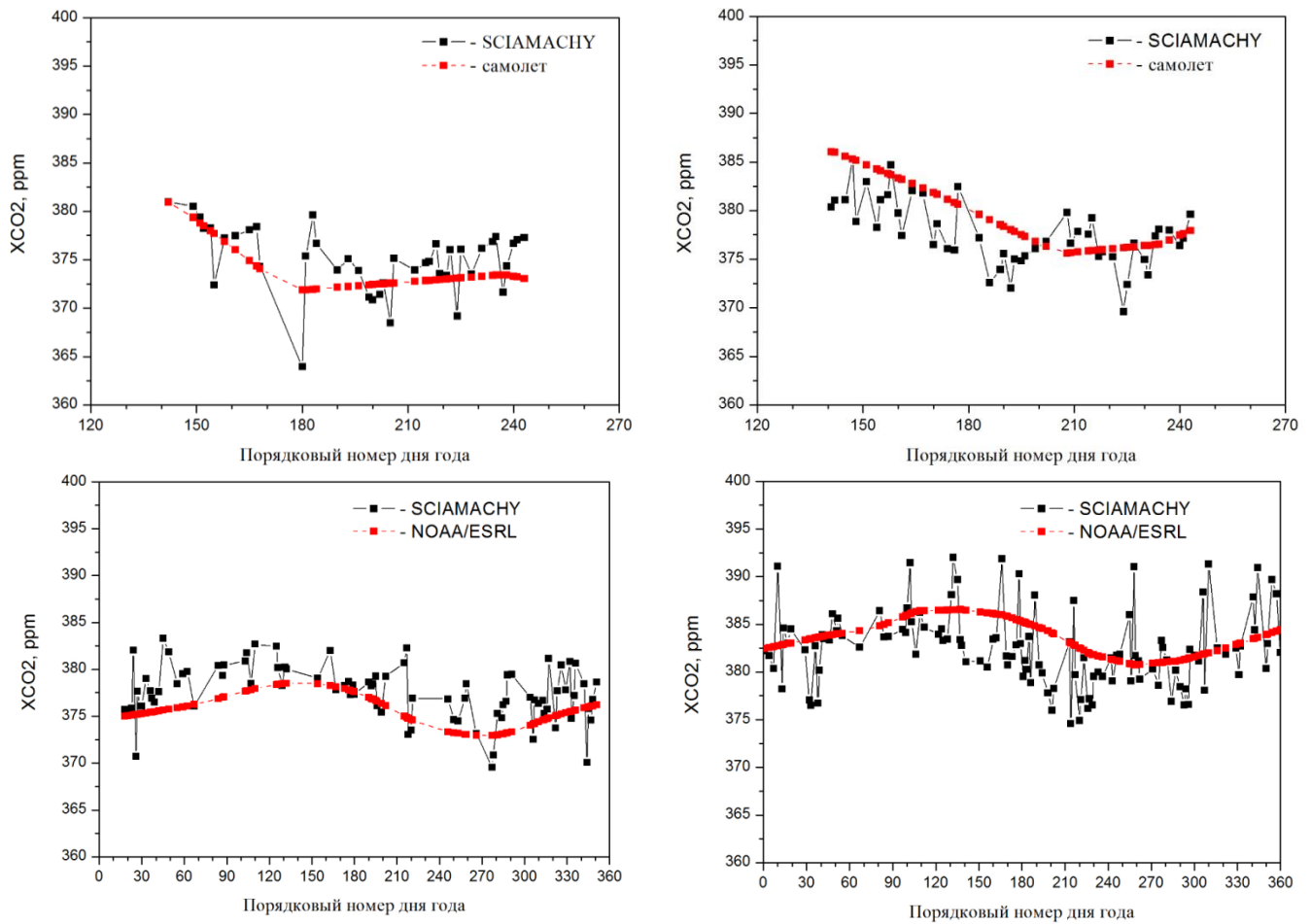


Рисунок 10 - Сравнение спутниковых оценок концентрации CO₂ с данными контактных измерений: а) Сургут, 2004 г.; б) Сургут, 2007 г.; в) Мауна Лоа, 2003 г.; г) Мауна Лоа, 2007 г.

Достигнутая точность примерно в 3-4 раза выше точности алгоритма WFM-DOAS, рассмотренного в разделе 5.2, и хорошо совпадает с теоретическими оценками раздела 5.3.

Если спутниковые оценки XCO₂ нужны, главным образом, для разработки и валидации различных моделей прогнозирования климатических изменений, то для обоснования различных политических и экономических решений нужно знать источники и стоки углерода на земной поверхности. В Климатической доктрине России подчеркивается, в частности, что учет различных естественных источников (лесов, полей, болот и т.п.) выбросов и поглощения парниковых газов является приоритетной задачей. В связи с этим под руководством автора [Журавлева и др., 2006; Рублев и др., 2010] была разработана представленная в разделе 5.5 методика определения баланса (NEE - Net Ecosystem Exchange) нисходящих и восходящих потоков CO₂ в бореальных лесах на основе регрессий,

связывающих результаты наземных измерений потоков CO_2 с параметрами атмосферы. С использованием спутниковых оценок параметров атмосферы и подстилающей поверхности проведен расчет среднемесячных значений углеродного баланса хвойных лесов Красноярского края в 2001 году. Показано, что основная масса хвойных лесов Красноярского края обеспечивает сток углерода, поглощая до 300 гС/м^2 за полный вегетационный сезон.

Глава 6 диссертации посвящена оценке дополнительных возможностей и ограничений, которые целесообразно учитывать при использовании данных глобальной наземной сети AERONET. Общая характеристика измерений в сети AERONET представлена в разделе 6.1. В этом же разделе автором оценены дополнительные ошибки калибровки каналов базового прибора AERONET – многоканального солнечного фотометра CIMEL. Физическая природа этих ошибок обусловлена различием в условиях измерений на большинстве станций и калибровок, осуществляемых на склоне вулкана Мауна-Лоа (Гавайи). Дело в том, что через интерференционные фильтры, формирующие спектральную избирательность каналов CIMEL, проходит дополнительно, вне рабочей полосы пропускания, некоторое количество фонового излучения. В качестве фона для CIMEL выступает прямое СИ, проинтегрированное в диапазоне чувствительности $200 \div 1100 \text{ нм}$ кремниевого детектора. При калибровках на Мауна-Лоа на высоте 3400 м при идеально чистой атмосфере фон больше, чем на остальных измерительных пунктах сети AERONET, расположенных вблизи уровня моря и проводящих измерения при наличии аэрозольной дымки. Разница в фоне вызывает смещение в калибровочных константах, которые в УФ каналах CIMEL могут достигать 0.003 даже при косинусе зенитного угла Солнца более 0.3. В остальных каналах смещение меньше 10^{-3} при любой аэрозольной замутненности и почти для всех зенитных углов Солнца.

В разделе 6.2 анализируется влияние крупных пылевых частиц на точность восстановления оптических характеристик аэрозоля по наземным измерениям спектральных потоков прямого и рассеянного солнечного излучения. Показано, что особенности рассеяния СИ крупными пылевыми частицами – ярко

выраженный дифракционный пик и поглощение почти половины падающего на них света – предъявляют особые требования к алгоритмам определения оптических характеристик аэрозоля. Выполненная проверка подобного алгоритма сети AERONET с применением специальных тестовых аэрозольных моделей показало невозможность использования восстановленных с его помощью их оптических характеристик⁵ для расчета интегральных солнечных потоков, когда количество пылевых частиц в атмосфере в два и более раз превышает их фоновое значение в континентальной модели аэрозоля CONT (WCP-112, 1986). Учитывая существенную разницу в спектральном ходе основных оптических характеристик тестовых моделей и их восстановленных значений, пылевые модели AERONET нельзя использовать и для определения характеристик собственного излучения возмущенной атмосферы. Это нужно учитывать при разработке и валидации спутниковых алгоритмов детектирования пылевых выносов из районов пустынь по измерениям ИК-зондировщиков типа IASI или ИКФС-2.

Раздел 6.3 посвящен разработке методики определения общего содержания (ОС) NO_2 по измерениям спектральных оптических толщин атмосферы сети AERONET [Рублев и др., 2004, 2005; Rublev et al., 2008, 2009]. Основная идея предложенного подхода состоит в том, что методом наименьших квадратов по измеренным оптическим толщинам в 7 спектральных каналах CIMEL определяются параметры нескольких аэрозольных моделей и соответствующие им значения ОС NO_2 . Лучшая модель и ей ОС NO_2 выбирается по минимуму среднего квадрата невязки между измеренными и модельными (NO_2 + аэрозоль) оптическими толщинами в каналах CIMEL, т.е. реализован классический критерий отношения правдоподобия, используемый при проверке статистических гипотез. При определении ОС NO_2 применялись аэрозольные модели, включающие 9 базовых фракций. Идея использования мелкодисперсных слабо поглощающих фракций и композитных субмикронных фракций для воспроизведения спектрального хода АОТ в широком диапазоне изменения показателей Ангстрема была подсказана автору Г. И. Горчаковым (ИФА). В

разделе дана конкретная реализация алгоритма выбора аэрозольной модели, включая расчет невязок σ измеренных и восстановленных оптических толщин в каналах CIMEL. Здесь же указаны оцениваемые параметры аэрозольных моделей, поправки, вводимые в измерения AERONET, для компенсации вклада рассеянного излучения, остаточных ошибок калибровки и др., дан перечень используемых опорных фракций, порядок построения моделей из фракций.

Сравнение оценок ОС NO_2 по данным AERONET с результатами других независимых измерений изложено в разделе 6.4. Для Москвы сравнение выполнено на основе оценок ОС диоксида азота, рассчитанных по вертикальным профилям концентрации NO_2 (Rublev et al, 2008, 2009). Прямые контактные измерения концентрации NO_2 проводились на 4 уровнях (от 0 до 350 м) Останкинской телебашни с октября 2006 года. На основании линейной интерполяции данных этих измерений в поверхностном слое до 400 м, самолетных измерений в тропосфере над Северной Европой, а также фоновых профиля в стратосфере были получены среднемесячные значения ОС NO_2 . В 2007 г. диапазон изменения этих значений в единицах Добсона (ед) составил от 1.2 ед (июнь) до 2.2 ед (ноябрь) при среднем 1.4 ед. Эти значения хорошо согласуются с полученными по данным измерений AERONET среднегодовыми оценкам ОС NO_2 в МО МГУ: 1.0 ед (в 2003 г.); 1.4 ед (2004÷2006 г.г.).

Для сопоставления с данными SCIAMACHY за несколько лет (2003-2006 гг.) было определено ОС NO_2 для 20 станций AERONET, расположенных в индустриальных районах, где имелись данные визуальных наблюдений облачности с ближайших наземных метеостанций [Rublev et al, 2008, 2009]. Для корректного сравнения было необходимо добиться максимального пространственно-временного совпадения между измерениями CIMEL и оценками по данным SCIAMACHY. С этой целью использовались два критерия:

- 1) расстояние между пунктом AERONET и обрабатываемым пикселем SCIAMACHY должно быть не более 30 км;

- 2) разница во времени между измерениями AERONET и SCIAMACHY должна быть меньше 2 часов.

Для некоторых пунктов число совпадений не превышало несколько единиц. С целью увеличения статистики, например, были объединены выборки по Москве и Нью-Йорку, полагая, что антропогенное загрязнение атмосферы в этих мегаполисах имеет сходный характер. Скорректированное значение ОС NO_2 - Q_{cl} для восстановленного по данным SCIAMACHY Q_{NO_2} определяется как отношение $Q_{cl} = Q_{\text{NO}_2} / (1 - 0.65 p_0)$, полученное с учетом измерений концентраций NO_2 на Останкинской телебашне, по которым примерно 65% молекул NO_2 в Москве находятся ниже облаков, т.е. экранируются. Результаты сравнения оценок ОС NO_2 по данным AERONET и SCIAMACHY для Москвы и Нью-Йорка показаны на рисунке 11(а). Коэффициент корреляции R между скорректированными данными Q_{cl} и ОС NO_2 по данным AERONET достигает 81%.

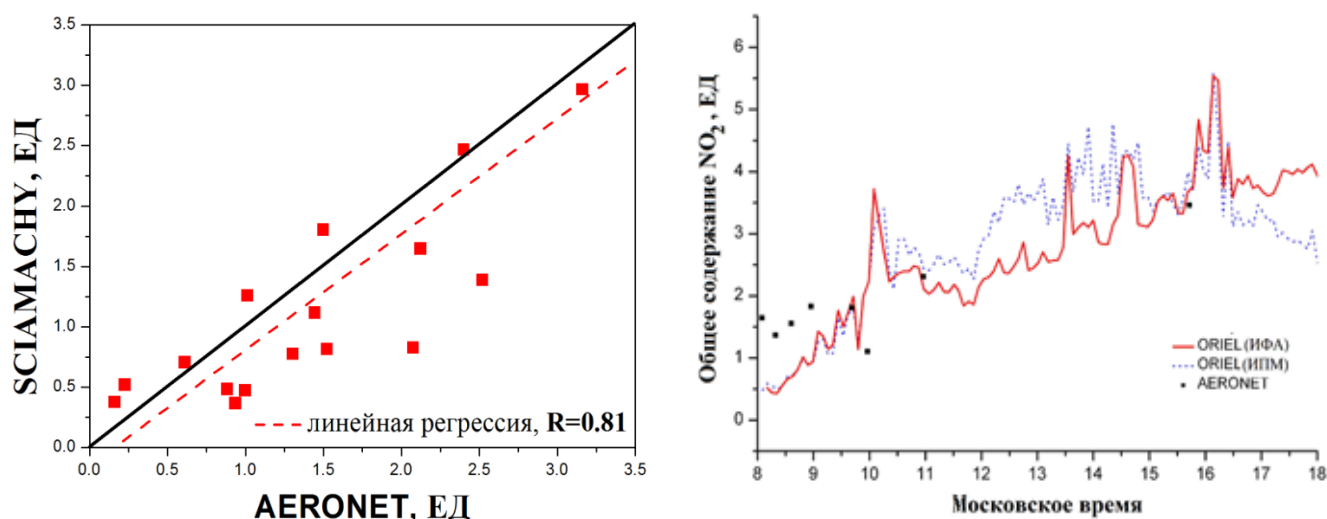


Рисунок 11 - Сравнение восстановлений ОС NO_2 с данными измерений:
а) SCIAMACHY, Москва&Нью-Йорк, 2003-2006 гг.; б) ORIEL, Москва, МГУ, 2008 г.

В Москве, на территории МГУ было проведено количественное сопоставление оценок ОС NO_2 по данным AERONET с оценками, полученными по методикам ИФА и ИПМ, на основе измерений спектров рассеянного света спектрометром ORIEL (рисунок 11б). ценки ОС NO_2 по данным AERONET и Oriel хорошо совпадают при малых зенитных углах Солнца, когда влияние вертикального профиля концентрации NO_2 и аэрозольной замутненности атмосферы на оценки ORIEL минимально. В утренние часы при низком положении Солнца неопределенность в задании вертикального профиля NO_2

может приводить к существенной изменчивости оценок по данным Oriel. Например, на рисунке 11б они близки к фоновым значениям, не характерным для столичного мегаполиса.

В разделе 6.5 приведено описание разработанной под руководством автора интерактивной процедуры Calculator of Solar Integral Fluxes – CSIF2002 (<http://litms.molnet.ru/csif/index.php>) для расчета интегральных солнечных потоков в безоблачной атмосфере и ее модификации CSIF2009, позволяющей дополнительно оценивать радиационный форсинг аэрозоля и NO₂ в условиях безоблачной атмосферы. Рабочий экран CSIF2002 приведен на рисунке 12.

Процедуры CSIF основаны на вычислении различных солнечных потоков быстрыми интерполяциями в зависимости от зенитного угла Солнца; основных характеристик аэрозоля (оптическая толщина при 500 нм, параметр Ангстрема, альбеда однократного рассеяния – SSA); количества осажденной воды; ОС NO₂, т.е. параметров атмосферы, которые определяются по данным AERONET. Дополнительно задаются ОС озона и спектральный ход альбеда подстилающей поверхности.

The Calculator of Solar Integral Fluxes under clear-sky conditions

Input parameter	Value	Range
Cosine of the Solar Zenith Angle:	0.5	0.0 - 1.0
Aerosol optical depth:	0.15	0.0 - 0.6
Angstrom parameter:	1.0	-0.1 - 2.0
Column water vapor (g*cm ⁻²):	3.0	0.0 - 6.0
Surface type:	Grass	
NO ₂ content (DU):	1.5	0.0 - 10.0
Ozone content (DU):	336.0	250.0 - 450.0
Pressure (mb):	1013.0	970.0 - 1013.0

Submit Reset

Output parameter	Normalized fluxes	Absolute fluxes (W/m ²)
Global downward radiative flux at the surface:	0.672	459.4
Direct downward radiative flux at the surface:	0.528	361.035
Diffuse downward radiative flux at the surface:	0.144	98.365
Absorption by the surface:	0.513	350.66
Absorption in the atmosphere:	0.265	181.46
Outgoing radiative flux at TOA:	0.222	151.48

Questions and comments: Viacheslav Trembach (trembach@imp.kiae.ru) | Last updated: 4 October 2006

RRC "KURCHATOV INSTITUTE" INSTITUTE OF MOLECULAR PHYSICS | JOHNS HOPKINS UNIVERSITY | Award RG2-2235

Рисунок 12 - Интерфейс калькулятора солнечных интегральных потоков CSIF2002

Используя данные AERONET для задания параметров аэрозоля, водяного пара и ОС NO₂ вместе с климатическими данными по содержанию озона, проверка CSIF2002 была выполнена сравнением результатов расчетов потоков

нисходящего СИ с прямыми измерениями на Звенигородской научной станции ИФА (Golitsyn et al, 2003). Сравнение показало хорошее согласие между измеренными и рассчитанными потоками

В **Заключении** изложены наиболее важные результаты работы и перспективы дальнейших исследований. Главным итогом диссертационной работы является решение крупной научной проблемы по созданию универсального набора методик и алгоритмов метода МК, пригодность которых для проведения радиационных расчетов как в интересах различных климатических приложений, так и для разработки дистанционных способов определения параметров атмосферы подтверждена натурными измерениями. Разработанные методики и алгоритмы позволяют строго, без каких-либо упрощений описывать процесс переноса солнечного и теплового излучения в земной атмосфере.

Основные результаты работы можно сформулировать следующим образом:

1. На основе набора данных радиозондирования NOAA-88/89 (~8000 вертикальных профилей температуры и влажности из различных районов земного шара) создана база реалистических моделей земной атмосферы, отражающих горизонтально-неоднородную структуру разорванной и многослойной облачности. Разработана специальная методика моделирования разорванной облачности нормальным случайным полем, параметры корреляционной функции которой определяются только баллом облаков, их средней толщиной и диаметром.
2. Разработаны трехмерные алгоритмы, позволяющие рассчитывать профили потоков солнечного излучения и собственного излучения атмосферы и моделировать измерения спектрометров в условиях разорванной и многослойной облачности. Созданы методика и соответствующие алгоритмы получения угловых моделей анизотропии солнечного излучения для интерпретации спутниковых измерений радиационного баланса применительно к сферической модели Земли.
3. Разработан новый способ детектирования облачности по данным ИК-зондировщика IASI. Экспериментальная проверка способа по данным реальных измерений самолетного интерферометра NAST-I, близкого по своим характеристикам к IASI, подтвердила его работоспособность

4. Получены количественные оценки влияния крупных пылевых частиц на точность восстановления оптических характеристик аэрозоля по наземным измерениям спектральных потоков прямого и рассеянного солнечного излучения. Показана невозможность использования оценок аэрозольных параметров, получаемых в сети AERONET, для расчетов интегральных солнечных потоков и при моделировании спутниковых ИК измерений, когда концентрация пылевых частиц в атмосфере в два и более раз превышает их концентрацию в известной модели континентального аэрозоля CONT.
5. Разработана новая методика определения концентрации углекислого газа по данным измерений спектрометра SCIAMACHY спутника ENVISAT. Проведена проверка методики по данным независимых самолетных измерений концентрации CO_2 над районами Сургута и Новосибирска, а также наземных измерений лаборатории NOAA/ESRL на вулкане Мауна Лоа (Гавайи), показавшая хорошее согласие (в пределах 1%) спутниковых и опорных данных.
6. Разработана методика определения баланса (NEE - Net Ecosystem Exchange) нисходящих и восходящих потоков CO_2 в бореальных лесах с использованием спутниковых данных. Получены карты среднемесячного поглощения углерода сосновыми лесами Красноярского края.
7. Разработана методика определения общего содержания NO_2 по данным глобальной аэрозольной сети AERONET. Подтверждена ее работоспособность на основе сопоставления полученных оценок ОС NO_2 с результатами параллельных наземных и спутниковых измерений.
8. Разработано интерактивное программно-математическое обеспечение – CSIF2002/2009 для расчета солнечных потоков и оценки радиационного форсинга NO_2 и аэрозоля для широкого набора параметров атмосферы. Получены оценки радиационного форсинга для средних значений NO_2 , определенных по данным 20 пунктов сети AERONET в различных районах земного шара.

В ближайшие годы в соответствии с Федеральной космической программой России планируется запуск метеоспутников нового поколения в дополнение к двум («Метеор-М» №1 и «Электро» №1), уже действующим в космосе. В связи с этим разработанные методики и алгоритмы дистанционного определения параметров атмосферы будут использоваться для разработки и валидации новых информационных продуктов, получаемых по данным спутниковой целевой

аппаратуры оптического диапазона спектра. Расчеты интенсивности уходящего излучения применяются и будут применяться для дополнительной внешней калибровки действующей и перспективной отечественной бортовой аппаратуры, а также для разработки быстрых радиационных моделей, необходимых для решения обратных задач ДЗА.

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации

Публикации в рецензируемых журналах и трудах конференций

1. Бусыгин, В. П., Гаврилович, А. Б., **Рублев, А. Н.** Влияние озонного поглощения на прохождение УФ и видимого излучения через земную атмосферу по вертикальным и наклонным трассам // Вести АН Беларуси. Сер. физ.-мат. наук. — 1992.— №3.— С. 50-55.
2. Геогджаев, И. В., Кондранин, Т. В., **Рублев, А. Н.**, Чубарова Н. Е. Моделирование переноса УФ радиации через разорванную облачность и сравнение с измерениями // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. — 1997. — Т.33, №5.— С. 680-686.
3. Горчакова, И. А., Мохов, И. И., **Рублев, А. Н.** 2005: Влияние аэрозоля на радиационный режим безоблачной атмосферы по данным Звенигородских аэрозольно-облачно-радиационных экспериментов // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. — 2005. — Т. 41, №4. — С. 496-510.
4. Журавлева, Т. Б., **Рублев, А. Н.**, Удалова, Т. А., Чеснокова, Т. Ю. О вычислении фотосинтетически активной радиации при оценках параметров углеродного баланса наземных экосистем // Оптика атмосферы и океана. — 2006. — Т. 19, №1.— С. 64-68.
5. **Рублев, А. Н.**, Троценко, А. Н., Романов, П. Ю. Использование данных спутникового радиометра AVHRR для определения оптической толщины облачности // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. — 1997. — Т. 33, №5. — С. 670-675.
6. **Рублев, А. Н.**, Успенский, А. Б., Троценко, А. Н., Удалова, Т. А., Волкова, Е. В. Детектирование и оценка балла облачности по данным атмосферных ИК-зондировщиков высокого спектрального разрешения // Исследование Земли из космоса, РАН. — 2004. — №2. — С. 1-9.
7. **Рублев, А. Н.**, Чубарова, Н. Е., Троценко, А. Н., Горчаков, Г. И. Определение общего содержания NO₂ по данным сети AERONET // Изв. РАН, Физика атмосферы и океана. — 2004. — Т. 40, №1. — С.62-77.
8. **Рублев, А. Н.**, Чубарова, Н. Е., Троценко, А. Н., Горчаков, Г. И. Распознавание NO₂ на фоне аэрозольного ослабления (ответ на комментарий) // Изв. РАН, Физика атмосферы и океана. — 2005. — Т. 41, № 1. — С. 134-138.
9. **Рублев, А. Н.**, Успенский, А. Б. Оценка концентрации углекислого газа в тропосфере по данным измерений спектрометра SCIAMACHY в условиях облачности // Исследование Земли из космоса. — 2006. — №6. — С. 31-41.

10. **Рублев, А. Н.**, Бухвиц, М., Журавлева, Т. Б. Сопоставление спутниковых и самолётных измерений концентраций углекислого газа над Западной Сибирью // Оптика атмосферы и океана. — 2006. — Т. 19, №4. — С. 322-327.
11. **Рублев, А. Н.**, Григорьев, Г. Ю., Удалова, Т. А., Журавлева, Т. Б. Регрессионные модели для оценки углеродного обмена в бореальных лесах // Оптика атмосферы и океана. — 2010. — Т. 23, №1. — С. 21-26.
12. **Рублев, А. Н.**, Горчакова, И. А., Удалова, Т. А. Влияние крупных частиц на оценки оптических и радиационных характеристик пылевого аэрозоля // Изв. РАН, Физика атмосферы и океана. — 2011. — Т. 47, №2. — С. 1-11.
13. **Рублев, А. Н.**, Власова, Ю. В., Горбаренко, Е. В. Уточнение прогноза распространения загрязняющих веществ в атмосфере с помощью математического моделирования и инструментальных измерений // Метеорология и гидрология. — 2013. — №5. — С. 36-47.
14. Фомин, Б. А., **Рублев, А. Н.**, Троценко, А. Н. Эталонные расчеты потоков и притоков солнечной радиации в облачной и замутненной атмосфере // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. — 1994. — Т. 30, №3. — С. 301-308.
15. Успенский, А. Б., Троценко, А. Н., **Рублев, А. Н.** Определение общего содержания малых газовых составляющих атмосферы с помощью ИК-зондировщика IASI. I. Анализ информативности спектральных измерений // Исслед. Земли из космоса. — 1998. — №2. — С. 3-16.
16. Успенский, А. Б., Троценко, А. Н., **Рублев, А. Н.**, Романов, С. В., Романов, П. Ю. Определение общего содержания малых газовых составляющих в атмосфере с помощью ИК-зондировщика IASI: анализ точности результатов зондирования // Исслед. Земли из космоса. — 1999. — №1. — С. 79-86.
17. Успенский, А. Б., Троценко, А. Н., **Рублев, А. Н.** Проблемы и перспективы анализа и использования данных спутниковых ИК-зондировщиков высокого спектрального разрешения // Исследования Земли из космоса. — 2005. — №5. — С. 18-33.
18. Успенский, А. Б., Кухарский, А. В., **Рублев, А. Н.** Детектирование тропосферных вариаций CO₂ по данным спутникового ИК-зондировщика высокого спектрального разрешения // Исследования Земли из космоса. — 2006. — №4. — С. 42-52.
19. Успенский, А. Б., Кухарский, А. В., Романов С. В., **Рублев, А. Н.** Мониторинг концентрации диоксида углерода и общего содержания метана в тропосфере над Сибирью по данным спутниковых ИК-зондировщиков AIRS, IASI // Исследование Земли из космоса. — 2011. — №1. — С. 14-21.
20. Чубарова, Н. Е., **Рублев, А. Н.**, Троценко, А. Н., Трембач, В. В. Вычисление потоков солнечного излучения и сравнение с результатами наземных измерений в безоблачной атмосфере // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. — 1999. — Т. 35, №2. — С. 222-239.
21. Cahalan, R. F., L. Oreopoulos, A. Marshak, K. F. Evans, A. B. Davis, R. Pincus, K. H. Yetzer, B. Mayer, R. D. Thomas, P. Ackerman, H. W. Barker, E. E. Clothiaux, R. G. Ellingson, M. J. Garay, E. Kassianov, S. Kinne, A. Macke, W. O'Hirok, P. T. Partain, S. M. Prigarin, **A. N. Rublev**, G. L. Stephens, F. Szczap, E. E. Takara, T. Varnai, G. Wen, T. B. Zhuravleva 2005: The International Intercomparison of 3D Radiation Codes (I3RC): Bringing together the most advanced radiative

transfer tools for cloudy atmospheres. Bulletin of American Mathematical Society, DOI: 10.1175/BAMS-86-9-1275-1293.

22. Chubarova, N., **Rublev, A.**, Holben, B. Fires in Central Russia 2002 and their effects on optical properties of atmosphere and solar irradiance in different spectral regions. // *Optica Pura y Aplicada*. 2004. V. 37. No 3. Pp. 3321-3326.

23. Chubarova, N. Ye, Gorbarenko, E. V., Abakumova, G. M., Shilovtseva, O. A., Nezval' E. I. and **Rublev A. N.** The influence of forest and peatbog fires on the optical and radiative regimes of the atmosphere and radiative forcing over central Russia. In the Proceedings of the International Radiation Symposium "Current problems in Atmospheric Radiation", Busan, Korea, 23-28 August 2004, A. Deepak Publishing Humpton, Virginia, USA, pp. 439-442.

24. Chubarova, N. Ye., Prilepsky, N. G., **Rublev, A. N.**, Riebau, A. R. The 2002 Mega-fire Event in Central Russia: Meteorological, Radiative and Optical Properties of the Atmosphere and Possible Consequences for on Sub-boreal Forest Plants. *Wildland Fires and Air Pollution Developments in Environmental Science*, Volume 8 A. Bytnerowicz, M. Arbaugh, A. Riebau and C. Andersen (Eds). 2009 Elsevier. Pp. 249-267.

25. Chubarova, N. Ye., Larin, I. K., Lebedev, V. V., Partola, V. S., Lezina, Ye. A., **Rublev, A. N.** Experimental and Model Study of Changes in Spectral Solar Irradiance in the Atmosphere of Large City due to Tropospheric NO₂ Content. In *Current Problems In Atmospheric Radiation (IRS 2008) Proceedings of the International Radiation Symposium (IRC/IAMAS)*. Foz do Iguasu, Brazil, 3-8 August 2008. Eds. T. Nakajima, M. A. Yamasoe, AIP Conf. Proceedings, 1100, Melville, New York, 2009, pp. 459-462.

26. Feigelson, E. M., **Rublev, A. N.** and Emilenko, A. S. 2001: "Radiative Parameters of the Atmosphere and Clouds in the First IFA RAN Winter Radiative Experiment," *Izv., Atmos. Ocean. Phys.* 37 (Suppl. 1), S131–S133.

27. Fomin, B. A., Romanov, S.V., **Rublev, A. N.**, Trotsenko, A. N. Line-by-Line Procedures to Compute Radiative Transfer Parameters in Scattering Atmosphere. In *IRS-92: Current Problems in Atmospheric Radiation*, 1993, S. Keavallik and O. Karner, eds., A. DEEPAK Publishing, Hampton, VA, pp. 524-527.

28. Geogdzhaev, I. V., Kondranin, T. V., Chubarova, N. E. and **Rublev, A. N.** 1996. Comparison of UV measurements and modelling under broken cloudiness. In *IRS-96: Current Problems in Atmospheric Radiation*, Smith, W.L. and Stamnes, K. (eds.), *Proceedings of the International Radiation Symposium*, Fairbanks, Alaska 19-24 August 1996, Deepak Publishing, Hampton Virginia. Pp. 865-868.

29. Geogdzhaev, I. V., Kondranin, T. V., **Rublev, A. N.**, A radiative transfer model for broken cloudiness conditions. 1996. In *IRS-96: Current Problems in Atmospheric Radiation*, Smith, W.L. and Stamnes, K. (eds.), *Proceedings of the International Radiation Symposium*, Fairbanks, Alaska 19-24 August 1996, Deepak Publishing, Hampton Virginia. Pp. 151-154.

30. Golitsyn, G. S., Shukurov, A. K., Mokhov, I. I., Alekseev, A. I., Anikin, P. P., Chlenova, G. V., Djola, A. V., Dvoryashin, S. V., Elokhov, A. S., Emilenko, A. S., Feigelson, E. M., Glushchenko, Yu. V., Gorchakova, I. A., Grechko, E. I., Gruzdev, A. N., Isakov, A. A., Olshansky, D. I., Plakhina, I. N., Romashova, E. V., Shukurova, L. M., Sidorov, V. N., Sviridenkov, M. A.,

Tikhonov, A. V. Tolstobrov, V. G., Petrushin, A. G., **Rublev, A. N.** 2000. ZCAREX-99: First winter Zvenigorod Cloud-Aerosol-Radiation Experiment. IRS 2000: Current Problems in Atmospheric Radiation, W. L. Smith and Yu. M. Timofeyev (Eds.). A. Deepak Publishing, Hampton, Virginia. Pp. 1051-1054.

31. Golitsyn, G. S., Shukurov, A. K., Mokhov, I. I., Alekseev, A. I., Anikin, P. P., Chlenova, G. V., Djola, A. V., Dvoryashin, S. V., Elokhov, A. S., Emilenko, A. S., Feigelson, E. M., Glushchenko, Yu. V., Gorchakova, I. A., Grechko, E. I., Gruzdev, A. N., Isakov, A. A., Olshansky, D. I., Plakhina, I. N., Romashova, E. V., Shukurova, L. M., Sidorov, V. N., Sviridenkov, M. A., Tikhonov, A. V. Tolstobrov, V. G., Petrushin, A. G., **Rublev, A. N.** 2000. ZCAREX-99: First winter Zvenigorod Cloud-Aerosol-Radiation Experiment. IRS 2000: Current Problems in Atmospheric Radiation, W. L. Smith and Yu. M. Timofeyev (Eds.). A. Deepak Publishing, Hampton, Virginia. Pp.1051-1054.

32. Jacquinet-Husson, N., Scott, N. A., Cheidin, A., Armante, R., Chursin, A. A., Barbe, A., Birk, M., Brown, L. R., Camy-Peyret, C., Clerbaux, C., Dana, V., Mandin, Mikhailenko, S., Nemtchinov, V., Nikitin, A., Perrin, A., **Rublev, A.**, Schreier, F., Schult, L., Tashkun, S. A., Teffo, J. L., Toth, R. A., Tyuterev, V. G., Vander-Auwera, J. and Wagner, G. 2005: The 2003 edition of the GEISA/IASI database. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, V. 95, Issue 4, 1 Nov. 2005. Pp. 429-467.

33. Jacquinet-Husson, N., Scott, N. A., Chédin, A., Armante, R., Capelle, V., Orphal, J., ABarbe, A., Camy-Peyret, C., Di Lonardo, G., Flaud, J. M., Goldman, A., Hess, M., Hurley, D., Köpke, P., Mikhailenko, S., Nemtchinov, V., Nikitin, A. D., Perrin, A., Perevalov, V. I., Pinnock, S., Rinsland, C. P., **Rublev, A.**, Schreier, F., Schult, L., Tashkun, S. A., Teffo, J. L., Toth, R. A., Tyuterev, V. G., Vander Auwera, J., Varanasi, P., Wagner. 2008: The GEISA spectroscopic database: Current and future archive for Earth and planetary atmosphere studies. G. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, V.109, 6. Pp. 1043-1059.

34. **Rublev, A.**, Trotsenko A., Chubarova, N. et al. 1997: The use of satellite data for determination of downward solar radiation fluxes at cloudy conditions and their comparison with ground-based measurements, In IRS'96: Current Problems in Atmospheric Radiation, Smith and Stamnes (Eds.), A. Deepak Pub., Hampton, VA, USA. Pp. 488-491.

35. **Rublev, A.**, Trembach, V. 3D Monte-Carlo models and radiative transfer online tools. Intercomparison of three-dimensional radiation codes, 2000: In Intercomparison of three-dimensional radiation codes: Abstracts of the first and second international workshops /Cahalan, R. F., and R. Davies (eds.). University of Arizona Press, Tucson (AZ), ISBN 0-9709609-0-5. Pp. 14-18, URL: <http://i3rc.gsfc.nasa.gov/abstracts-new/kiae.pdf>.

36. **Rublev, A.**, Uspensky, A., Trotsenko, A. & Chubarova, N.. Solar flux derivation using MSG-SEVIRI measurements. 2000. Solar flux derivation using MSG-SEVIRI measurements. First MSG RAO Workshop, held 17-19 May, 2000, at CNR, Bologna, Italy. Edited by R.A. Harris. ESA, ESASP-452, 2000. Pp.145-148.

37. **Rublev, A. N.**, Trotsenko, A. N., Trembach, V. V. and Kopylov, A. V., 2001: Online software for simulation of radiation measurements, in IRS 2000: Current Problems in Atmospheric

Radiation, W. Smith and Yu. Timofeyev (Eds.). A. Deepak Publishing, Hampton, Virginia. Pp. 1105-1108.

38. **Rublev, A. N.**, Udalova, T. A., Uspensky, A. B. 2004: Validation of the Cloud Discrimination/Identification procedures and Output Products against Experimental data. CD/CI Validation Report. LITMS Technical Note. Ref. LITMS/EUM/04.004, 11 p.

39. **Rublev, A.**, Uspensky, A., Udalova, T.: 2005: Detection and identification of unresolved clouds in the measurements from the Infrared Atmospheric Sounding Interferometer (IASI). Proc. 31st Int. Sympos. on Remote Sens. of Environment. June 20–24, St.-Peterburg, Russia, 2005. URL: <http://www.isprs.org/publications/related/ISRSE/html/papers/938.pdf>.

40. **Rublev, A. N.**, Trotsenko, A. N., Udalova, T. A., Zysina, N. Yu., Kuznetsov, V. S., Chubarova, N. Ye., Nezval', Ye. I., Rozental', V. A., Sharaev, G. A., Gorchakov, G. I., Sviridenkov, M. A., Gruzdev, A. N., Elokhov, A. S., Glyadkov, P. S., Bass, L. P., Nikolaeva, O. V. Determination of NO₂ in the surface layer of the atmosphere. RRC Kurchatov Institute. Preprint IAE-6506/16, 52 p. 2008.

41. **Rublev, A.**, Uspensky, A., Trotsenko, A. et al. Mathematical Simulation of Satellite Measurements to Develop Spectroscopic Methods of CO₂ Determination in the Presence of Thin or Broken Clouds. In Current Problems In Atmospheric Radiation (IRS 2008) Proceedings of the International Radiation Symposium (IRC/IAMAS). Foz do Iguasu, Brazil 3-8 August 2008. Eds. T. Nakajima, M. A. Yamasoe, AIP Conf. Proceedings, 1100, Melville, New York, 2009. Pp. 85-88.

42. **Rublev, A.**, Richter, A., Gorchakov, G., Trotsenko, A., Udalova, T., Zysina, N., Chubarova, N. Comparison of Ground-Based and Satellite Estimates of NO₂ Columns under Anthropogenic Pollution. In Current Problems In Atmospheric Radiation (IRS 2008) Proceedings of the International Radiation Symposium (IRC/IAMAS). Foz do Iguasu, Brazil 3-8 August 2008. Eds. T. Nakajima, M. A. Yamasoe, AIP Conf. Proceedings, 1100, Melville, New York, 2009. Pp. 498-501.

43. **Rublev, Alexey** and Trotsenko, Anatoly. Fast radiative transfer model to simulate spectroscopic measurements of outgoing IR radiances in cloudy conditions Radiation Processes in the Atmosphere and Ocean (IRS 2012). Dahlem Cube, Free University, Berlin 6-10 August 2012. Eds. R. F. Cahalan & J. Fisher., Proceedings of the International Radiation Symposium (IRC/IAMAS), Melville, New York, 2013. Pp. 115-118.

44. Trembach, V. V., **Rublev, A. N.** and Udalova, T. A. 2001: Mathematical simulation of surface solar radiation distribution at broken clouds conditions, in IRS 2000: *Current Problems in Atmospheric Radiation*, W. L. Smith and Yu. M. Timofeyev (Eds.). A. Deepak Publishing, Hampton, Virginia. Pp. 1058-1060.

45. Trotsenko, A. N., **Rublev, A. N.**, Romanov, S. V. et al. 1995: Line-by-line radiative parameters databases in atmospheric sensing and modelling applications. In Atmospheric Sensing and Modeling II, Richard P. Santer, Editor, Proc. SPIE , 2582. Pp. 221-232

46. Trotsenko, A. N., **Rublev, A. N.**, Romanov, S. V. et al. 2001: Efficient forward model to simulate IASI/METOP measurements and its validation against high-resolution field observations, in IRS 2000: *Current Problems in Atmospheric Radiation*, W. Smith and Yu. Timofeyev (Eds.). A. Deepak Publishing, Hampton, Virginia. Pp. 401-404.

47. Uspensky, A., Camy-Peyret, C., **Rublev, A.** et al. Derivation of Tropospheric Carbon Dioxide and Methane Concentrations in the Boreal Zone from Satellite High Resolution Infrared

Sounders Data. In Current Problems In Atmospheric Radiation (IRS 2008) Proceedings of the International Radiation Symposium (IRC/IAMAS). Foz do Iguasu, Brazil, 3-8 August 2008. Eds. T. Nakajima, M. A. Yamasoe, AIP Conf. Proceedings, 1100, Melville, New York, 2009. Pp. 347-350.

Другие публикации

48. **Рублев, А. Н.**, Голомолзин, В. В. Моделирование кучевых облаков: Препринт РНЦ «Курчатовский институт» — ИАЭ-5567/16. М., 1992. — 12 с.
49. **Рублев, А. Н.** Алгоритм и результаты расчетов аэрозольных индикатрис. Препринт РНЦ «Курчатовский институт». 1994. — 51 с.
50. **Рублев, А. Н.**, Троценко, А. Н., Геогджаев, И. В. Вычисление энергетических характеристик уходящего солнечного излучения для интерпретации измерений спутникового радиометра ScaRaB. Препринт РНЦ «Курчатовский институт» — ИАЭ-5915/1.1995. — 16 с.
51. **Рублев, А. Н.**, Чубарова, Н. Е., Горчаков, Г. И., Трембач, В. В., Улюмджиева, Н.Н. Потоки солнечного излучения в безоблачной атмосфере: расчеты и наземные измерения в различных регионах: сборник тезисов Международного симпозиума стран СНГ «Атмосферная радиация» (МСАР-2002), Санкт-Петербург, Россия, 22-25 июня 2002 г. — СПб., 2004. — С. 33-34.
52. **Рублев, А. Н.**, Трембач, В. В., Троценко, А. Н., Удалова, Т. А., Успенский, А. Б. Применение трехмерного метода Монте-Карло и моделей многослойной облачности для разработки и тестирования оперативных радиационных алгоритмов: сборник тезисов Международного симпозиума стран СНГ «Атмосферная радиация» (МСАР-2004), Санкт-Петербург, Россия, 22-25 июня 2004 г. — СПб., 2004. — С. 25-26.
53. Fomin, B. A., Romanov, S. V., **Rublev, A. N.**, Trotsenko, A. N. Line-by-line benchmark calculations of solar radiation transfer parameters in a scattering atmosphere. // Препринт IAE 5525/1. М.: ИАЭ. 1992. 26 с.
54. Fomin, B. A., Romanov, S. V., **Rublev, A. N.**, Trotsenko, A. N. Radiance calculations in scattering and absorbing atmospheres using line-by-line computer models. // Proc. XI Symp. and School on High Resol. Mol. Spectrosc., 1993. Washington: SPIE Publ. 1994. V.2205. Pp. 409-412.
55. Geogdzhaev, I., Kondranin, T., **Rublev, A.** and Chubarova, N. Modeling UV-Radiation Transfer through Broken Cloudiness and Comparison with Measurements, In: Proc. of the international conference " Past, Present and Future Climate". 1995, Helsinki, Finland. Pp. 389-392.
56. Golitsyn, G. S., Gorchakova, I. A., Mokhov, I. I. and **Rublev A. N.** 2003. "Aerosol Radiative Forcing During Spring-Summer 2002 from Measurements at IAP Scientific Station Near Moscow". In Proceedings of the 13th Atmospheric Radiation Measurement Science Team Meeting, Ed. By D. Carrothers, Department of Energy, Richland. URL: http://www.arm.gov/publications/proceedings/conf13/extended_abs/golitsyn-gs.pdf.
57. Golitsyn, G. S., Gorchakova, I. A., Mokhov, I. I. and **Rublev, A. N.** 2003: Aerosol Radiative Forcing During Spring-Summer 2002 from Measurements at IAP Scientific Station near Moscow. Thirteenth ARM Science Team Meeting Proceedings, Broomfield, Colorado, March 31-April 4, 2003, URL: http://www.arm.gov/publications/proceedings/conf13/extended_abs/golitsyn-gs.pdf.
58. Gorchakov, G. I., Golitsyn, G. S., Anikin, P. P., Emilenko, A. S., Isakov, A. A., Kopeikin, V. M., **Rublev, A. N.**, Sviridenkov, M. A. and Shukurov, K. A. The Optical and

Microphysical Characteristics of the Smoke Aerosol in the Moscow Region During the Summer-Autumn of 2002. Thirteenth ARM Science Team Meeting Proceedings, Broomfield, Colorado, 2003.

59. **Rublev, A. H.** and Trotsenko, A. N. 1999: "On development of a Fast Radiative Transfer Model to Simulate IASI Measurements in Cloudy Conditions", Technical Note to ISSWG, Version 1.0, Eumetsat contract EUM/CO/99/687/DD, April 1999. 12 p.

60. **Rublev, A. N.**, Chubarova, N. Ye., Trotsenko, A. N., Trembach, V. V., Zakharova, P. V. 1998: The evaluation of the applicability of the continental aerosol model for radiative transfer calculations. *Aerosols. Russian Aerosol Society*, v.4c, No.9, pp. 268-269.

61. **Rublev, A.**, Trembach, V., Trotsenko, A., Uspensky, A. 2000: Derivation of solar radiative characteristics in the atmosphere by SEVIRI/MSG data. The 2000 EUMETSAT Meteorological Satellite Data Users' Conference, Bologna, Italy, 29 May – 2 June 2000, 626-631.

62. **Rublev, A. N.**, Chubarova, N. and Gorchakov, G. 2004. "Anthropogenic NO₂ in the atmosphere: estimates of the column content and radiative forcing." In Proceedings of the Fourteenth ARM Science Team Meeting, U.S. Department of Energy, Richland, WA. 1-8. URL: http://www.arm.gov/publications/proceedings/conf14/extended_abs/rublev-a.pdf?id=96.

63. **Rublev, A.**, Richter, A., Udalova, T., Zysina, N., Gorchakova, I. Comparison of NO₂ column estimates from AERONET data with SCIAMACHY retrievals in industrialized regions. 2007. Proceeding of the EUMETSAT Meteorological Satellite Conference Amsterdam. 8 p.

64. **Rublev, Alexei**, Uspensky, Alexander, Camy-Peyret, Claude, Udalova, Tatiana. Regional estimates of CO₂ mixing ratio from SCIAMACHY data: methodology, retrieval and validation. Proceedings. Meteorological Satellite Conference, Cordoba, 2010, 8 p.

65. Trishchenko, A., **Rublev, A.**, Uspensky, A., Udalova, T., Zysina, N., Buchwitz, M., Rozanov, V., Rozanov, A., Zhuravleva, T., Wanga, S., Trotsenko, A., Fernandes, R. 2005: The potential and limitations of satellite observations for CO₂ retrievals over boreal forests. Proc. 31st Int. Sympos. on Remote Sens. of Environment. June 20–24, St.-Peterburg, Russia, 2005 URL: <http://www.isprs.org/publications/related/ISRSE/html/papers/519.pdf>.

66. Trotsenko, A., Uspensky, A., Kopylov, A., **Rublev, A.**: Modular prototype processor for geophysical parameters retrieval from IASI: pilot version. 2003: Proc. "The 2003 Eumetsat Meteorological Satellite Conf." Weimar, Germany, 29 Sept. – 03 Oct. 2003. Pp. 110-117.

67. Trotsenko, A., **Rublev, A.**, Romanov, S. The Use of Benchmark Calculation Characteristics of the Longwave Atmosphere Radiation in Meteorological Monitoring Problems and Investigations of the Earth Radiation Balance, RRC KURCHATOV INSTITUTE Preprint, 1995, IAE-5895/1, 46 p.

68. Uspensky, A., **Rublev, A.**, Trotsenko, A. 2001: A Bayesian cloud detection scheme using high spectral resolution IR sounder observation and experimental cloud data set: a simulation study. Proceedings. The 2001 Eumetsat meteorological Satellite data user's conf., Antalya, EUM-B33, pp. 638-645.

69. Uspensky, A. B., Kukharsky, A. V., Romanov, S. V., **Rublev, A. N.** Development of remote sensing techniques for detecting variations of atmospheric carbon dioxide concentrations from high-resolution infrared sounders. 2007. Proceeding of the EUMETSAT Meteorological Satellite Conference. Amsterdam. 8 p.