

РГБ ОД

29 АЯГ 2000

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

Ионов Дмитрий Викторович

**ИССЛЕДОВАНИЯ
ТОЧНОСТИ СПУТНИКОВЫХ МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЙ
ГАЗОВОГО СОСТАВА АТМОСФЕРЫ
(АППАРАТУРА GOME И SCIAMACHY)**

Специальность 04.00.23 – физика атмосферы и гидросферы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург

2000

Работа выполнена в Научно-исследовательском институте физики
Санкт-Петербургского государственного университета

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук, профессор Ю.М. Тимофеев

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, профессор И.Л. Кароль

кандидат физико-математических наук Л.П. Бобылев

Ведущая организация:

Государственный научный центр Российской Федерации - Арктический и
Антарктический научно-исследовательский институт

Защита состоится "13" ИЮЛЯ 2000 г. в 15⁰⁰ час. на заседании
диссертационного совета Д 063.57.51 по защите диссертаций на соискание ученой
степени доктора физико-математических наук в Санкт-Петербургском
государственном университете по адресу: 199034, Санкт-Петербург, Университетская
наб., 7/9, к. 317.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке СПбГУ.

Автореферат разослан "8" ИЮНЯ 2000 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
кандидат физико-математических наук


С.А. Зайцева

232.1с141.271,0

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Хозяйственная деятельность человека вносит существенные изменения в состав атмосферы и содержание различных атмосферных примесей, или малых газовых составляющих (МГС). В последние десятилетия проблема влияния атмосферных примесей на погоду и климат привлекла внимание широкого круга исследователей главным образом в связи с актуальными оценками ожидаемых последствий антропогенных воздействий на слой атмосферного озона. Многочисленные наблюдения зафиксировали уменьшение толщины озонового слоя в районе Антарктиды (т.н. озоновая дыра), а также в других районах земного шара. Антропогенные выбросы таких газов, как углекислый газ CO_2 и метан CH_4 , заметно увеличивают их естественное содержание в атмосфере. Изменения содержаний МГС, относящихся к группе парниковых газов (CH_4 , CO , N_2O , ХФМ, O_3 , CO_2) могут привести к заметным изменениям потоков радиации в атмосфере и распределения температуры, т.е. к изменению элементов климата.

Наиболее эффективным методом получения долговременных периодических данных о глобальных распределениях МГС в атмосфере являются дистанционные, и в первую очередь, спутниковые методы измерений. Современные потребности в получении глобальной информации о характеристиках атмосферы делают необходимым расширение списка определяемых газовых составляющих, предъявляя все более жесткие требования к точности измерений и пространственному (вертикальному и горизонтальному) разрешению. Одним из наиболее перспективных путей решения указанных задач является расширение спектральной области измерений уходящего излучения с высоким спектральным разрешением.

Прогресс приборостроения в области спутникового зондирования атмосферы привел к появлению нового класса приборов, позволяющих проводить измерения в видимой и ближней ИК-областях спектра в большом количестве каналов с относительно высоким спектральным разрешением. Типичными представителями аппаратуры этого класса являются приборы GOME (Global Ozone Monitoring Experiment) и SCIAMACHY (Scanning Imaging Absorption spectrometer for Atmospheric Cartography). Прибор GOME стал одним из инструментов, размещенных на борту

спутника ERS-2, запущенного в апреле 1995 года. Аппаратуру SCIAMACHY планируется разместить на борту спутника ENVISAT, запуск которого несколько раз откладывался, начиная с 1998 года, и должен состояться в 2001 году.

Точность определения газового состава атмосферы по данным спутниковых измерений обусловлена совокупностью разнообразных факторов: погрешность измерений прибора, абсолютная и спектральная калибровка, погрешности телеметрии, особенности алгоритма интерпретации, исходная спектроскопическая и априорная информация. Практическое использование данных о состоянии атмосферы возможно после тщательного анализа их соответствия предъявляемым требованиям точности, пространственного и временного разрешения, на основе интенсивных согласованных исследований по валидации спутниковых данных.

Система оперативной обработки данных измерений GOME основана на использовании методики дифференциального поглощения - алгоритма DOAS (Differential Optical Absorption Spectroscopy), разработанного для обработки результатов наземных, самолетных и аэростатных измерений. Методика DOAS позволяет восстанавливать с относительно высокой точностью наклонное содержание измеряемой газовой составляющей. Определение общего содержания измеряемой компоненты в вертикальном столбе атмосферы требует расчета соответствующей воздушной массы, величина которой заранее неизвестна. Альтернативным подходом к интерпретации результатов измерений GOME является строгое физико-математическое решение обратной задачи на основе специально разработанной радиационной модели атмосферы.

Планируемый в ближайшее время эксперимент SCIAMACHY позволит осуществлять измерения уходящего отраженного и рассеянного солнечного излучения в УФ и видимой и ближней ИК-области спектра (240 - 2380 нм) с относительно высоким разрешением – 0.2-1.4 нм. Очевидно, такие измерения содержат огромное количество информации о газовом составе атмосферы и требуют разработки специальных методик интерпретации. Важным этапом подобных исследований является анализ информативности будущих спутниковых измерений и расчет потенциальной точности определения содержаний восстанавливаемых компонент.

Цель диссертационной работы состояла в исследовании реальной точности действующих и анализе потенциальной точности разрабатываемых спутниковых приборов (GOME и SCIAMACHY) по определению газового состава атмосферы на основе измерений отраженного и рассеянного солнечного излучения. Выполнение данных исследований потребовало:

- Разработать универсальную систему валидации и визуализации оперативных данных спутникового прибора GOME.
- Провести валидацию данных GOME об общем содержании озона на основе сопоставлений с данными независимых наземных и спутниковых измерений.
- Осуществить собственные подспутниковые измерения общего содержания озона для валидации данных GOME.
- Сопоставить данные спутниковых измерений общего содержания NO_2 (GOME) с данными независимых наземных измерений.
- Провести восстановление общего содержания NO_2 на основе строгого физико-математического подхода к решению обратной задачи по интерпретации спектральных измерений GOME.
- Провести численный анализ характеристик молекулярного поглощения атмосферы в спектральной области измерений SCIAMACHY (ближняя ИК-область).
- Исследовать информативность измерений уходящего излучения в БИК области спектра относительно вертикальных профилей содержания водяного пара и метана.
- Получить оценки потенциальной точности определения содержания водяного пара и метана по измерениям уходящего излучения в эксперименте SCIAMACHY.

Научная новизна работы

Исследована реальная точность восстановления общего содержания озона (OCO) и NO_2 по измерениям спутникового прибора GOME (спутник ERS-2) в УФ и видимой области спектра. Впервые проведена валидация данных измерений GOME на основе сопоставлений с независимыми данными российской сети наземных измерений OCO ; осуществлено сопоставление данных GOME с одновременными наземными (озонметр M-124) и спутниковыми (TOMS, спутник EarthProbe) измерениями OCO . Выявлены существенные систематические расхождения данных

GOME об OCO с результатами независимых измерений. Проведено сопоставление данных GOME об OC NO_2 с данными одновременных наземных измерений в районе Звенигорода (Московская область). Отмечена неудовлетворительная точность восстановления OC NO_2 системой оперативной обработки данных GOME, основанной на упрощенной методике дифференциального поглощения.

Исследованы возможности интерпретации спектров измерений GOME на основе физико-математического подхода к решению обратной задачи по восстановлению общего содержания NO_2 при строгом учете переноса излучения в атмосфере. Результаты расчетов сопоставлены с данными оперативной обработки измерений GOME и данными независимых наземных измерений.

Проведен численный анализ информативности измерений уходящего отраженного и рассеянного солнечного излучения многоканальным спектрометром SCIAMACHY в БИК области спектра. Рассчитаны потенциальные точности определения общих содержаний водяного пара и метана, а также вертикального профиля влагосодержания по измерениям SCIAMACHY.

Научная и практическая ценность работы

Сопоставление данных GOME (ERS-2) об OCO с результатами одновременных измерений на российских озонметрических станциях в 1996-2000 гг. выявило существенное систематическое занижение величины OCO в данных GOME (4-9 %), по сравнению с наземными наблюдениями. Достоверность полученных результатов и качество российских измерений подтверждается одновременными сопоставлениями всех наземных измерений OCO с данными спутникового прибора TOMS (спутник EarthProbe).

Интерпретация спектров измерений GOME в области 420-450 нм на основе строгого физико-математического подхода к решению обратной задачи позволяет получить более близкое согласие спутниковых данных об OC NO_2 с данными независимых наземных измерений, по сравнению с системой оперативной обработки данных GOME.

Рассмотрены возможности использования измерений рассеянной и отраженной солнечной радиации из космоса в полосе поглощения водяного пара при 1.38 мкм для определения влагосодержания атмосферы. Численное моделирование

спутникового эксперимента показало возможность получения информации о профиле влажности в тропосфере (3-4 слоя) с погрешностью 5-10 %. Показано, что косвенный метод оценки может позволить определять с высокой точностью (~1 %) общее влагосодержание атмосферы. Отмечена возможность восстановления общего содержания метана с потенциальной точностью ~5 % по измерениям рассеянной и отраженной солнечной радиации в полосе поглощения при 2.32 мкм.

Полученные результаты могут быть использованы для разработки алгоритмов интерпретации будущих измерений прибора SCIAMACHY и валидации спутниковых данных о газе составе атмосферы, а также для совершенствования системы оперативной обработки данных измерений прибора GOME. В частности, представляемые результаты валидации данных GOME использовались для проверки новой версии системы оперативной обработки измерений GOME (2.7) в рамках специальной международной программы, организованной Европейским Космическим Агентством [7].

Основные положения, выносимые на защиту

- Результаты исследований реальной точности определения общего содержания озона по измерениям спутникового прибора GOME (спутник ERS-2).
- Оценки точности наземных измерений общего содержания озона на российских озонметрических станциях (озонметр M-124) по результатам сопоставлений с данными прибора TOMS (спутник EarthProbe).
- Результаты сопоставления данных GOME об общем содержании NO_2 с данными независимых наземных измерений.
- Интерпретация данных спектральных измерений GOME на основе физико-математического подхода к решению обратной задачи по восстановлению общего содержания NO_2 при строгом учете переноса излучения в атмосфере.
- Оценки погрешности методов расчета молекулярного поглощения на основе статистической модели полосы в БИК области спектра.
- Численные оценки потенциальной точности определения общих содержаний водяного пара, метана и вертикального профиля влагосодержания по измерениям спутникового прибора SCIAMACHY (спутник ENVISAT) в БИК области спектра.

Апробация работы и публикации

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на международном симпозиуме "Third ERS Symposium on Space at the service of our Environment: Environmental monitoring of St.Petersburg region using ERS data" (Италия, 1997), международном симпозиуме "27th International Symposium of Remote Sensing of Environment: Conference on Information for Sustainability" (Норвегия, 1998), международном симпозиуме " European Symposium on Atmospheric Measurements from Space" (Голландия, 1999), международном симпозиуме " The 22nd General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics (IAMAS Symposia)" (Великобритания, 1999), международном симпозиуме стран СНГ "Атмосферная Радиация" (Россия, 1999), а также на семинарах кафедры физики атмосферы физического факультета СПбГУ. По теме диссертации опубликовано 8 печатных работ, включая тезисы докладов. Основные результаты опубликованы в реферируемых журналах (список публикаций приводится в конце автореферата). В работах, написанных в соавторстве, личный вклад соискателя состоял в разработке алгоритмов и проведении численных расчетов, сборе и обработке данных измерений, анализе и интерпретации полученных результатов.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Диссертация изложена на 182 страницах машинописного текста; содержит 55 рисунков, 21 таблицу и список литературы из 100 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Введение отражает актуальность темы диссертации и современное состояние проблемы. Во введении сформулированы цели и задачи диссертационной работы, кратко описана структура диссертации.

В первой главе, носящей обзорный характер, обсуждается современное состояние и актуальность исследований газового состава атмосферы Земли спутниковыми методами, дана краткая классификация методов дистанционного зондирования окружающей среды, описаны современные спутниковые эксперименты

по глобальному мониторингу газового состава атмосферы – GOME и SCIAMACHY, представлены математические аспекты анализа информативности планируемых спутниковых экспериментов, сформулирована задача валидации спутниковых данных и приведен обзор результатов международной валидации данных эксперимента GOME об общем содержании озона.

С начала функционирования прибора GOME были проведены многочисленные сопоставления его измерений с другими системами наблюдений – наземными и космическими. Для анализа качества данных GOME об ОСО привлекались данные наземных (спектрометры Добсона, Брюера, различные фотометры, сумеречное зондирование и т.д.), озонозондовых и спутниковых (TOMS, TOVS) измерений. Результаты этих исследований дают противоречивую картину согласованности данных GOME с независимыми наблюдениями, демонстрируя как занижение величины ОСО в данных GOME (8-12 %), так и противоположный эффект (до 15 %). Для однозначной оценки точности измерений GOME требуются постоянные сопоставления новых данных с результатами разнообразных независимых измерений во всем диапазоне условий спутникового эксперимента.

Во второй главе рассмотрены результаты валидации оперативных данных спутникового эксперимента GOME об ОСО на основе многочисленных сопоставлений с результатами российских наземных измерений.

Для решения решения круга задач, связанных с валидацией (сопоставление с независимыми данными), и визуализацией (визуальный анализ пространственных полей) результатов измерений GOME необходимо располагать системой, позволяющей осуществлять поиск измерений с заданными характеристиками и их графическое представление. Данные требования послужили основанием для разработки собственной системы разностороннего анализа данных GOME на основе современной технологии географических информационных систем (ГИС).

Сведения об основных исследованиях по валидации данных GOME об ОСО и их результаты представлены в сводной таблице 1.

- Проведено сопоставление данных GOME об общем содержании озона (ОСО) с результатами наблюдений на семи российских озонометрических станциях в июле и сентябре-октябре 1996 года. Данные GOME дают в среднем на 6-12 % более низкие значения ОСО, по сравнению с наземными измерениями.

- Аналогичное сопоставление ограниченного ансамбля данных измерений ОСО за весь 1996 (каждая 15-я орбита), обработанных различными версиями системы оперативной обработки GOME, с данными наземных измерений, выявило занижение величины ОСО в среднем на 8%, 7% и 6% для версии 2.0 (1996), 2.4 (1998) и 2.7 (1999), соответственно. По результатам сопоставления полного ансамбля данных GOME об ОСО в 1996 году (все орбиты) с данными измерений на 7 российских станциях среднее расхождение составляет 6% и 4% для данных версии 2.0 и 2.7, соответственно (Рисунок 1).
- Дополнительно, данные GOME об ОСО были сопоставлены с собственными наземными экспедиционными измерениями соискателя в устье Кандалакшского залива Белого моря (Карелия) летом 1997-98 гг. Для измерений ОСО использовался озонметр М-124, калиброванный по спектрофотометру Добсона №108 (ГГО, Санкт-Петербург). В течение одной недели в июле 1997 года данные GOME были в среднем на 9% ниже наземных измерений ОСО, а в период с 15 июля по 15 августа 1998 года – на 5%.
- Кроме того, данные GOME об ОСО были сопоставлены с одновременными измерениями на 38 станциях озонметрической сети России и стран СНГ в период с декабря 1999 по март 2000 года; при этом данные GOME оказались в среднем на 4% ниже результатов наземных измерений.

Таблица 1 Сводная таблица основных результатов сопоставлений данных GOME об общем содержании озона с данными российских наземных измерений (озонметр М-124).

район измерений	период сопоставлений	версия данных GOME, №	Δ , %	σ , %
северная и центрально-европейская часть России (42-62° с.ш., 4-70° в.д.)	01.07-31.07, 23.09-22.10.1996	2.0	- 8.8	10.1
	01.01-31.12.1996	2.0	- 6.1	8.6
		2.7	- 4.2	7.1
Карелия (66° с.ш., 34° в.д.)	16.07-24.07.1997	2.0	- 8.6	8.8
	15.07-15.08.1998	2.3	- 5.3	6.0
Россия и страны СНГ (38-76° с.ш., 24-170° в.д.)	01.11.1999 - 15.03.2000	2.7	- 4.2	10.8

Δ и σ - средние и среднеквадратичные расхождения <GOME – М124>

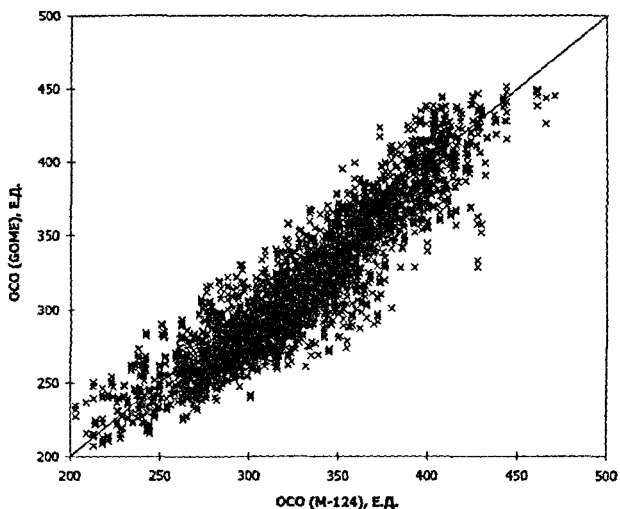


Рисунок 1 Сопоставление оперативных данных GOME об общем содержании озона (OCO, версия 2.7) с результатами одновременных измерений на 7 российских озонметрических станциях в 1996 году (озонметр М-124).

Таким образом, результаты многочисленных сопоставлений выявили существенное систематическое занижение величины OCO в данных GOME (4–9 %), по сравнению с наземными наблюдениями. Достоверность полученных результатов и качество российских измерений подтверждается одновременными сопоставлениями наземных измерений с данными спутникового прибора TOMS; средние расхождения при этом составляли 0–2 %. Анализ данных GOME разных версии обработки (2.0, 2.3 и 2.7) демонстрирует постепенное уменьшение систематических расхождений между данными GOME об OCO и результатами независимых измерений, связанное с совершенствованием методики интерпретации.

В третьей главе приведены результаты исследований соискателя по валидации оперативных данных GOME об ОС NO₂, представлены примеры интерпретации данных спектральных измерений GOME на основе строгого учета теории переноса излучения в атмосфере, для определения общего содержания NO₂.

Проведено сопоставление результатов спутниковых измерений общего содержания NO₂ (GOME) в 1996 году и в первой половине 1998 года с данными

одновременных наземных измерений Звенигородской Научной Станции (ЗНС, Московская область) Института Физики Атмосферы (ИФА) РАН. Содержание NO_2 на ЗНС определяется сумеречным методом по измерениям интенсивности рассеянного из зенита солнечного излучения. Исследованы особенности валидации спутниковых данных об общем содержании NO_2 с учетом его суточных вариаций. На основе данных фотохимической модели показано, что изменения ОС NO_2 в районе ЗНС в течение светового дня могут составлять от 30% до 60%, в зависимости от сезона; сопоставление данных GOME с полусуммой результатов утренних и вечерних наземных наблюдений обеспечивает наибольшую временную согласованность измерений ОС NO_2 . Отмечено, что в ряде случаев данные измерений GOME значительно превышают результаты наземных наблюдений. Среднее расхождение между данными GOME и полусуммой результатов утренних и вечерних наземных измерений в первой половине 1996 года составляет около 33%. Оценки точности спутниковых измерений в 1998 году дают несколько лучшие результаты по сравнению с данными 1996-го – среднее расхождение составляет 8%, что связано с совершенствованием методики обработки измерений GOME. В целом, согласие данных спутниковых и наземных измерений общего содержания NO_2 неудовлетворительное – среднеквадратичные расхождения составляют 67% в первом полугодии 1996 и 57% в первом полугодии 1998 года. Для однозначного вывода о качестве данных измерений GOME требуется, в частности, уточнить временную и пространственную согласованность сопоставляемых данных.

Система оперативной обработки спектральных измерений GOME опирается на использование методики DOAS, определяющей общее наклонное содержание восстанавливаемой газовой составляющей, с последующим расчетом коэффициентов воздушной массы AMF (Air Mass Factor) для преобразования наклонных содержаний в искомые вертикальные. Методика DOAS основана на интерпретации дифференциальной структуры полосы поглощения, которая совмещается с линейной комбинацией спектров молекулярного поглощения после вычета широких спектральных составляющих, связанных с рассеянием, альбедо поверхности и слабо меняющимися по спектру компонентами.

Для восстановления вертикального профиля содержания озона по данным измерений GOME в Институте Дистанционного Зондирования Бременского

университета был создан алгоритм FURM (Full Retrieval Method), основанный на специально разработанной для интерпретации измерений GOME радиационной модели GOMETRAN. Для решения обратной задачи используется традиционный метод статистической регуляризации. Помимо поглощения озона, в формировании уходящего излучения участвуют и другие составляющие атмосферы, априорная информация о которых недостаточна для точного восстановления профиля озона. Поэтому, в алгоритм FURM был включен ряд дополнительных параметров, восстанавливаемых в процессе решения. Среди них – поправки к альбедо поверхности, аэрозольному содержанию и общему содержанию NO_2 .

В данной работе алгоритм FURM использовался для восстановления общего содержания NO_2 в атмосфере на основе интерпретации спектров уходящего излучения, измеренных GOME. Использовались спектры GOME в области 420-450 нм, соответствующие надирным измерениям в районе Звенигорода с пространственным разрешением $40 \times 960 \text{ км}^2$. Результаты оперативной обработки измерений GOME в марте, мае, ноябре и декабре 1996 года отличаются от одновременных наземных измерений на Звенигородской Научной Станции в среднем на 42% (среднеквадратичное отклонение). Использование альтернативной системы интерпретации, основанной на алгоритме FURM, позволяет уменьшить эти расхождения до 12-18 %, в зависимости от априорной информации о профиле NO_2 . В алгоритме FURM в качестве априорного профиля NO_2 используются данные расчетов по двумерной транспортно-фотохимической модели атмосферы, разработанной в институте им. Макса Планка в Германии. Проведенное исследование показывает, что на широте Звенигорода эта модель дает неоправданно высокие значения содержания NO_2 в нижней тропосфере, что в частности проявляется в искаженном сезонном ходе общего содержания NO_2 по сравнению с данными независимых наземных наблюдений (Звенигород) и многолетних спутниковых измерений аппаратуры HALOE (спутник UARS). Использование в качестве априорной информации о профиле NO_2 данных стандартной среднеглобальной модели US Standard представляется предпочтительней, что подтверждается расчетами.

Четвертая глава посвящена анализу потенциальной точности определения газового состава атмосферы по измерениям отраженного и рассеянного солнечного излучения спутниковым прибором SCIAMACHY в БИК области спектра. Запуск

SCIAMACHY запланирован на 2001 год и его работа существенно расширит спектральную область измерений и набор определяемых МГС, по сравнению с измерениями GOME.

На основе разработанной автором упрощенной методики расчета функций пропускания безоблачной атмосферы проведено численное исследование характеристик молекулярного поглощения в спектральной области измерений SCIAMACHY. Выбраны полосы поглощения основных газовых составляющих, требующие учета при интерпретации спутниковых измерений: водяной пар, углекислый газ, кислород, метан, а также полосы слабого поглощения окиси углерода CO и закиси азота N₂O.

Исследованы погрешности различных методов расчета молекулярного поглощения атмосферы. Проведено сравнение результатов расчета поглощения на основе статистической модели полосы (известная радиационная модель MODTRAN) с прямым (полинейным) расчетом. Рассмотрены полосы поглощения четырех газовых составляющих: H₂O, CO₂, O₂ и CH₄, лежащие в БИК области спектра (0.6-2.5 мкм). Сделан вывод о высокой точности расчетов по модели MODTRAN, допускающей ее использование при решении ряда задач атмосферной оптики. В частности, MODTRAN может использоваться для численного анализа потенциальной точности определения газового состава атмосферы по измерениям прибора SCIAMACHY.

Для анализа потенциальных возможностей измерений SCIAMACHY использовался традиционный подход, основанный на расчетах матриц ошибок решения обратной задачи с помощью метода статистической регуляризации. Расчеты ядер интегрального уравнения задачи для различных моделей атмосферы, спектральных каналов измерений и условий спутникового эксперимента осуществлялись численно с помощью программы MODTRAN.

Изучены возможности использования измерений рассеянной и отраженной солнечной радиации из космоса в полосе поглощения водяного пара при 1.38 мкм для определения влагосодержания атмосферы. Наличие достаточно сильного поглощения в рассматриваемой полосе водяного пара позволяет использовать измерения спектральных зависимостей уходящего излучения для осуществления вертикального сканирования при изучении влагосодержания атмосферы. Возможная область такого вертикального сканирования определяется содержанием водяного

пара в атмосфере, геометрией спутниковых наблюдений и условий освещения атмосферы солнечным излучением, а также, в общем случае, спектральным разрешением прибора. При малом влагосодержании атмосферы рассматриваемый спутниковый метод может позволить получить информацию о вертикальной структуре влагосодержания тропосферы. В случае значительного влагосодержания вертикальное сканирование может быть осуществлено в значительно более широком высотном диапазоне - от поверхности Земли до высот 30 км. Численное моделирование спутникового эксперимента показало возможность получения информации о профиле влажности в тропосфере (3-4 слоя) с погрешностью 5-10 %, а в условиях высокого влагосодержания и в стратосфере - с ошибкой в 20% (3-4 слоя). Указывается, что косвенный метод оценки может позволить определять с высокой точностью (~1 %) общее влагосодержание атмосферы.

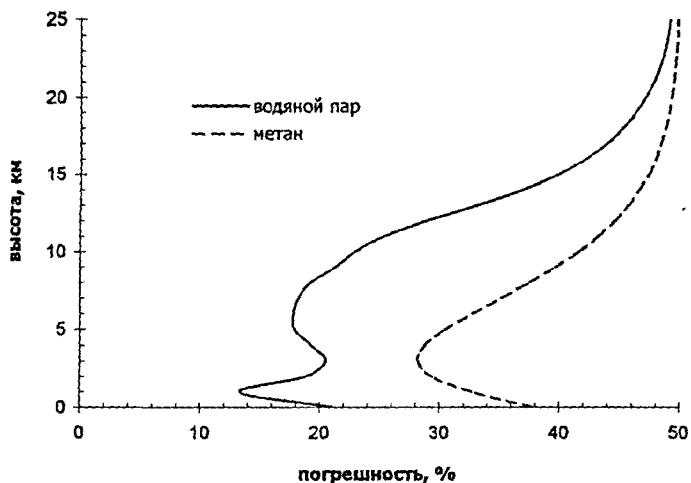


Рисунок 2 Погрешности восстановления вертикального профиля содержания водяного пара (полоса 1.38 мкм) и метана (полоса 2.32 мкм) по измерениям спутникового прибора SCIAMACHY (априорная неопределенность содержаний - 50%).

Рассмотрены возможности определения содержания метана в атмосфере по измерениям рассеянной и отраженной солнечной радиации из космоса в полосе

поглощения метана при 2.32 мкм. Относительно слабое поглощение в исследуемой полосе приводит к преобладанию компоненты отраженного излучения в уходящей радиации, обуславливая потенциально низкую информативность измерений SCIAMACHY для восстановления вертикального профиля содержания метана. Отмечена возможность определения общего содержания метана с потенциальной точностью ~5 %.

Результаты расчетов погрешности восстановления вертикального профиля содержания водяного пара и метана по измерениям SCIAMACHY представлены на рисунке 2.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы работы:

1. Проанализированы реальные точности определения общего содержания озона (OCO) по измерениям спутникового прибора GOME (спутник ERS-2, 1995). Результаты многочисленных сопоставлений оперативных данных GOME об OCO с данными независимых наземных измерений российской озонометрической сети в 1996-2000 гг. выявили существенное систематическое занижение величины OCO в данных GOME (4-9%).
2. Достоверность результатов валидации данных GOME об OCO и качество российских измерений подтверждены одновременными сопоставлениями наземных измерений с данными спутникового прибора TOMS.
3. Сопоставление данных GOME об общем содержании NO₂ с результатами наземных измерений в районе Звенигорода в 1996 и 1998 гг. продемонстрировало плохое согласие данных спутниковых и наземных измерений – среднеквадратичные расхождения составили 67% и 57%, соответственно.
4. Интерпретация данных спектральных измерений GOME на основе классического подхода к решению обратной задачи по восстановлению общего содержания NO₂ позволяет улучшить согласие спутниковых данных с результатами наземных измерений, по сравнению с данными оперативной обработки GOME.
5. Исследована информативность спутниковых измерений уходящего отраженного и рассеянного солнечного излучения в БИК области спектра для восстановления газового состава атмосферы. Получены численные оценки точности определения содержаний водяного пара и метана по измерениям спутникового прибора

SCIAMACHY (спутник ENVISAT, 2001). Потенциальная точность восстановления общего содержания водяного пара по измерениям SCIAMACHY в полосе поглощения при 1.38 мкм составляет ~1%, а погрешности определения влагосодержания в 3-4 слоях тропосферы составляют 5-10%. Измерения SCIAMACHY в полосе поглощения метана при 2.32 мкм позволяют рассчитывать на определение общего содержания метана с точностью ~5%.

По теме диссертации соискателем опубликованы следующие работы:

1. *Ионов Д.В., Поляков А.В.* Сравнение методов расчета функций пропускания безоблачной атмосферы в БИК-области спектра // *Исследования Земли из космоса.* 1996. N 4. С.3-11.
2. *Ионов Д.В., Поляков А.В., Тимофеев Ю.М.* Об определении содержания водяного пара в атмосфере по отраженному и рассеянному солнечному излучению из космоса // *Исследования Земли из космоса.* 1996. N 6. С.52-58.
3. *Ионов Д.В.* Об определении содержания метана в атмосфере по отраженному и рассеянному солнечному излучению из космоса // *Исследования Земли из космоса.* 1997. N 5. С.3-7.
4. *Ионов Д.В., Тимофеев Ю.М., Ионов В.В., Шаламянский А.М., Йоханнессен О.М., Борроуз Дж.П.* Сопоставление измерений общего содержания озона спектрометром GOME (ERS-2) по данным российской озонметрической сети // *Исследования Земли из космоса.* 1998. N 4. С.14-22.
5. *Ионов Д.В., Тимофеев Ю.М., Ионов В.В., Шаламянский А.М.* Сравнение измерений общего содержания озона аппаратурой GOME (спутник ERS-2) с данными озонметрической сети для Северо-Запада России // *Вестник СПбГУ.* 1998. Сер.4 вып.3 (№18). С.108-111.
6. *D.V. Ionov, Yu.M. Timofeyev, V.V. Ionov, A.M. Shalamiansky, O.M. Johannessen, J.P. Burrows.* Comparison of total ozone measurements by GOME spectrometer (ERS-2) with data of Russian ozonometric network. - Proc. of the Conf. on Information for Sustainability, 27th International Symposium of Remote Sensing of Environment, Tromso, Norway, 8-12 June, 1998, pp.274-277.
7. *Y.M. Timofeyev, D.V. Ionov, V.V. Ionov, A.M. Shalamiansky, N.F. Elansky, A.S. Elokho, A.M. Gruzdev, O.V. Postyljakov* Delta characterisation of GOME data products with the

Russian monitoring network // ERS-2 GOME Data Products Delta Characterisation Report 1999, J.-C. Lambert and P. Skarlas (Ed.), ESA/ESRIN, 1999, pp.61-76.

8. *Ионов Д.В., Ю.М. Тимофеев, В.В. Ионов, А.М. Шаламянский, Дж.П. Борроуз, О.М. Йоханнессен.* Валидация измерений общего содержания озона (аппаратура GOME) с помощью российской наземной озонметрической сети // Материалы конференции: Международный Симпозиум стран СНГ "Атмосферная Радиация", 12-15 июля 1999, Санкт-Петербург, с.118