

На правах рукописи



Ганьшин Александр Викторович

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРЕХМЕРНЫХ ПОЛЕЙ КОНЦЕНТРАЦИИ
ДИОКСИДА УГЛЕРОДА В АТМОСФЕРЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
ЭЙЛЕРОВО-ЛАГРАНЖЕВОГО ПОДХОДА ДЛЯ АНАЛИЗА
СПУТНИКОВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ**

25.00.29 - Физика атмосферы и гидросферы

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук**

Москва

2013

Работа выполнена в Федеральном Государственном Бюджетном Учреждении
«Центральная Аэрологическая Обсерватория», г. Долгопрудный

Научный кандидат физико-математических наук Лукьянов
руководитель: Александр Николаевич

Официальные доктор физико-математических наук Дианский
оппоненты: Николай Ардальянович
кандидат физико-математических наук Зарипов
Радомир Булатович

Ведущая Федеральное Государственное Бюджетное
организация: Учреждение науки Институт физики атмосферы
им. А.М.Обухова Российской академии наук

Защита состоится « 26 » июня 2013 года в « 13:00 » часов на заседании
диссертационного совета Д 327.008.01 в федеральном государственном
бюджетном учреждении «Институт прикладной геофизики им. Е.К. Фёдорова»
по адресу: 129128 г. Москва, Ростокинская ул., 9.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБУ «ЦАО» по адресу:
141700 Московская область, г. Долгопрудный, ул. Первомайская, д. 3.

Автореферат разослан « 24 » мая 2013 года

Учёный секретарь диссертационного совета:

к.ф.-м.н.



Хотенко Е.Н.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

В выводах доклада Межправительственной группы экспертов по изменению климата отмечается, что наблюдаемые температурные тренды воспроизводятся климатическими моделями только при учёте растущих антропогенных выбросов парниковых газов, основным из которых является диоксид углерода (CO_2). Поэтому оценка выбросов CO_2 является важной задачей для определения его влияния на климатические изменения.

Для достижения этой цели необходимо решить целый комплекс задач, включающий в себя восстановление пространственно-временной структуры источников диоксида углерода, их влияние на наблюдаемую концентрацию CO_2 и перенос эмиссий воздушными массами. В России в рамках тематики Росгидромета под руководством ФГБУ «ИГКЭ Росгидромета и РАН» проводятся измерения концентраций парниковых газов на станциях фоновое мониторинга и составляются кадастры их антропогенных выбросов на основе локальных измерений потоков парниковых газов с последующим их осреднением на региональном уровне. Однако в настоящее время инвентаризация выбросов парниковых газов затруднена ввиду ограниченности сети наземных измерений.

Поэтому для оценки приземных эмиссий также широко применяется другой подход, характерной чертой которого является использование данных глобальных наблюдений концентраций атмосферных компонент и математических моделей переноса для восстановления пространственно-временной структуры источников и стоков, т.е. обратного моделирования. В этом случае количественные оценки потоков интересующих нас веществ определяются путём минимизации разницы наблюдаемых и модельных концентраций.

Для реализации этого подхода необходимы четыре ключевые составляющие: сами данные наблюдений за концентрациями (наземные,

самолетные, спутниковые), модель переноса (позволяющая корректно описывать концентрацию интересующей нас примеси), метеорологические поля (используемые в модели переноса), а также априорные оценки эмиссий парниковых газов.

Для увеличения количества наблюдений и получения более однородного покрытия в последнее время осуществляются запуски спутниковых приборов, способных предоставить информацию о содержании парниковых газов в толще атмосферы.

Так в 2009 году был дан старт международному проекту по мониторингу парниковых газов GOSAT (Greenhouse gases Observing SATellite), в котором автор принимает участие в части разработки и применения моделей переноса примесей, чем и обусловлена тематика диссертации. Конечной целью проекта является определение источников и стоков диоксида углерода и метана, их местонахождения, сезонную изменчивость, что в итоге поможет лучше понять механизмы, регулирующие углеродный баланс и причины глобального потепления. Кроме того, автор принимает участие в работах по тематике Росгидромета, связанной с измерением концентраций парниковых газов на станциях фонового мониторинга.

Точность решения обратной задачи по восстановлению источников и стоков парниковых газов напрямую зависит от точности прямого моделирования концентраций этих компонент. Усовершенствование прямых моделей переноса парниковых газов и являлось основной задачей диссертации.

Кроме того спутниковые данные, полученные в условиях облачности, необходимо либо отфильтровывать, либо корректировать. Особенную проблему представляют перистые облака, которые трудно обнаружить вспомогательными приборами. В этой связи в задачу автора также входило моделирование пространственного распределения перистых облаков, что являлось дополнительным независимым критерием качества данных наблюдений парниковых газов. Эти направления и определили основное содержание диссертации.

Целью данной работы являлось

1. Моделирование концентрации диоксида углерода на станциях фонового мониторинга, вдоль трасс самолетов и орбиты спутника, что позволяет исследовать суточные и сезонные вариации CO_2 в точке наблюдения, определять области влияния на измеряемую концентрацию, а также корректировать глобальные и региональные эмиссии CO_2 на основе обратного моделирования.

2. Моделирование оптической толщи перистых облаков для отбора наиболее достоверных спутниковых данных концентраций парниковых газов, полученных в безоблачных условиях.

В данной работе решались следующие основные задачи

- разработка алгоритма расчёта концентрации диоксида углерода с использованием объединенной эйлеровой/лагранжевой модели и приземных потоков высокого разрешения, включающая в себя выбор подходящих моделей переноса, а также метеорологических данных, модификацию выбранных моделей под поставленную задачу и создание программного кода на языке ФОРТРАН;
- анализ данных измерений на основе модельных расчетов;
- разработка алгоритма расчёта оптической толщи перистых облаков с помощью траекторной модели, включающей схему параметризации перистых облаков;
- валидация моделей по схеме модель/наблюдения;

Научная новизна работы состоит в следующем

- Разработана глобальная совмещенная эйлеровая/лагранжевая модель переноса атмосферных примесей, позволяющая получить более достоверные результаты;

- Впервые совмещенная эйлеровая/лагранжевая модель переноса атмосферных примесей была применена для расчета концентрации диоксида углерода в точке наблюдения;
- Впервые были рассчитаны концентрации углекислого газа в точке наблюдения с использованием глобальных поверхностных потоков углекислого газа с пространственным разрешением 1x1 км;
- Разработана атмосферная траекторная модель с параметризацией перистых облаков, позволяющая рассчитывать оптическую толщину перистых облаков, которые затруднительно обнаружить приборами, установленными на спутники мониторинга парниковых газов.

Достоверность полученных результатов

Достоверность полученных результатов и положений, выносимых на защиту, прямо или косвенно подтверждается корректностью применяемых методов. Модели прошли валидацию с помощью сравнения с другими моделями, демонстрирующими хорошее согласие с экспериментальными данными. Кроме того проведено сравнение модельных значений с данными наблюдений. Полученные результаты и сделанные на их основе выводы опубликованы в реферируемых научных журналах и получили международное признание.

Практическое значение полученных результатов заключается в том, что разработанные модели позволяют

- рассчитать концентрацию атмосферных компонент в любой заданной точке;
- проводить анализ данных станционных, самолетных и спутниковых наблюдений;

- восстанавливать источники и стоки парниковых газов с применением обратного моделирования;
- получать информацию о пространственном распределении перистых облаков для фильтрации спутниковых данных концентрации парниковых газов.

На защиту выносятся

- Совмещённая эйлеровая/лагранжевая модель переноса атмосферных примесей. Алгоритм расчёта концентрации диоксида углерода на станциях фоновое мониторинга и вдоль орбиты спутника с использованием совмещённой модели и приземных потоков высокого разрешения (1 км x 1 км).
- Результаты расчётов концентрации диоксида углерода на станциях фоновое мониторинга, вдоль трассы самолёта и орбиты спутника. Результаты сравнений с наблюдениями.
- Атмосферная траекторная модель с параметризацией перистых облаков. Алгоритм расчёта оптической толщи перистых облаков с помощью траекторной модели.
- Результаты расчётов оптической толщи перистых облаков и сравнений со спутниковыми наблюдениями.

Личный вклад автора

Автор принимал участие на всех этапах работы, в формулировке задачи, выборе методов решения, разработке численных алгоритмов, проведения расчетов, интерпретации результатов. Все результаты, представленные в диссертационной работе, получены автором самостоятельно или при его непосредственном участии в коллективе соавторов.

Апробация работы

Основные результаты, представленные в диссертации, докладывались на всероссийских и международных ежегодных конференциях в Европе, Японии и США, а также научных семинарах в ЦАО. Некоторые результаты использования разработанных моделей по расчету и анализу экспериментальных данных, включая представленные в диссертации, опубликованы автором в работах [1-10].

Структура и объём работы

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и приложения, изложенных на 126 страницах машинописного текста, в том числе 46 рисунков и 4 таблицы, в списке цитируемой литературы 119 наименований.

Во введении показана актуальность проблемы, цели диссертационной работы и практическое значение результатов.

В первой главе приведен литературный обзор по теме диссертации, в том числе информация о спутниковых наблюдениях за парниковыми газами из космоса, а также определен эйлеров и лагранжев метод описание среды.

Во второй главе дано описание разработанной объединенной (эйлеровой/лагранжевой) модели GELCA, которая является комбинацией сеточной глобальной модели переноса NIES TM и лагранжевой дисперсионной мультитраекторной модели FLEXPART, приведено описание методики расчета концентрации с её помощью, дано описание используемых поверхностных потоков CO₂.

Для моделирования были использованы три вида источников диоксида углерода: антропогенные источники, обмен биосферы и атмосферы, обмен океана и атмосферы. Совместно они описывают основные типы источников и стоков диоксида углерода. Также можно использовать информацию о лесных пожарах (в качестве компонент биосферных потоков), но в этой работе она не применялась. Упомянутые выше три основных типа потоков обычно используются на сетке 1°×1°, однако такого разрешения может быть

недостаточно для описания сильных локальных источников диоксида углерода. Поэтому были использованы потоки с высоким пространственным разрешением – 1×1 км. Результаты моделирования представлены, как с градусным, так и с километровым разрешением. Градусные потоки аналогичны километровым, отличие заключается лишь в разрешении.

Информация об антропогенных эмиссиях CO_2 была взята из реестра Open source Data Inventory of Anthropogenic CO_2 emissions (ODIAC), в котором содержится информация о глобальном распределении выбросов антропогенного происхождения с разрешением 1×1 км. Для его построения используется информация о потреблении топлива на уровне стран, о распределении электростанций по всему миру, а также спутниковые наблюдения за ночными огнями.

Для оценки потоков CO_2 от растительности была использована модель земной биосферы VISIT, которая позволяет получить потоки с пространственным разрешением $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ и временным разрешением в 1 день для каждого из 15 типов растительности. Потоки, полученные на сетке $0.5 \times 0.5^\circ$, были пространственно проинтерполированы в каждый пиксель карты растительности с разрешением 1×1 км.

Океанические потоки были получены с помощью системы ассимиляции 4D-var, в которой офлайн биогеохимическая модель использует реанализированные морские течения, и позволяет моделировать парциальное давление CO_2 на поверхности океана ($p\text{CO}_2$), а также потоки CO_2 атмосфера–океан.

Для получения значений $p\text{CO}_2$ на поверхности океана использовались наблюдения за $p\text{CO}_2$ с кораблей и среднеклиматологические карты. В модели используется вариационный метод усвоения данных для моделирования $p\text{CO}_2$ с учетом наблюдений.

Данная система ассимиляции позволяет получить среднемесячные климатологические потоки CO_2 атмосфера–океан. Потоки построены на сетке

1°×1°, после чего переинтерполированы на сетку с разрешением 1×1 км, используя маску океан-суша, полученную из карты растительности.

Расчет концентрации диоксида углерода при использовании объединенной модели и информации о поверхностных источниках осуществляется способом, описанным ниже. Первоначально, в течение года до момента измерений эйлерова модель (NIES TM) рассчитывает глобальные фоновые концентрации, в которых отражается сезонная изменчивость. Затем в обратном направлении по времени используется лагранжевая дисперсионная модель (FLEXPART), которая в течение недели собирает вклад локальных наземных эмиссий в точку наблюдения за этот срок, а также определяет вклад в итоговую концентрацию в точке от фоновых значений, рассчитанных глобальной моделью (рисунок 1).

Формула модельного расчета концентрации может быть записана в следующем виде:

$$C(x_r, t_r) = \frac{T m_{air}}{h N L \rho m_{CO_2}} \sum_{ij} \sum_{l=0}^L F_{ij}^l \sum_{n=1}^N f_{ij}^{ln} + \frac{1}{N} \sum_{ijk} C_{ijk}^B \sum_{n=1}^N f_{ijk}^n \quad (1)$$

где $C(x_r, t_r)$ – концентрация (в единицах отношения смеси - ppm) в точке наблюдения x_r в момент времени t_r ;

T – продолжительность траектории;

m_{air} и m_{CO_2} – молярные массы воздуха и диоксида углерода

соответственно;

h – высота, до которой считается значимым влияние поверхностных потоков;

N – суммарное количество частиц;

L – количество шагов по времени;

ρ – средняя плотность воздуха ниже высоты h ;

i,j,k – индексы, характеризующие положение частицы в ячейке;

l – индекс по времени;

F_{ij}^l – поверхностные потоки (кг/м²/с);

f_{ij}^{ln} – принимает значения 1 (если частица находится в ячейке i,j на шаге n) или 0 (частица находится за пределами ячейки i,j на шаге n);

C_{ijk}^B – фоновые концентрации из эйлеровой модели;

f_{ijk}^n – принимает значения 1 (если частица находится в ячейке i,j,k) или 0 (частица находится за пределами ячейки i,j,k).

Алгоритм совмещённой модели

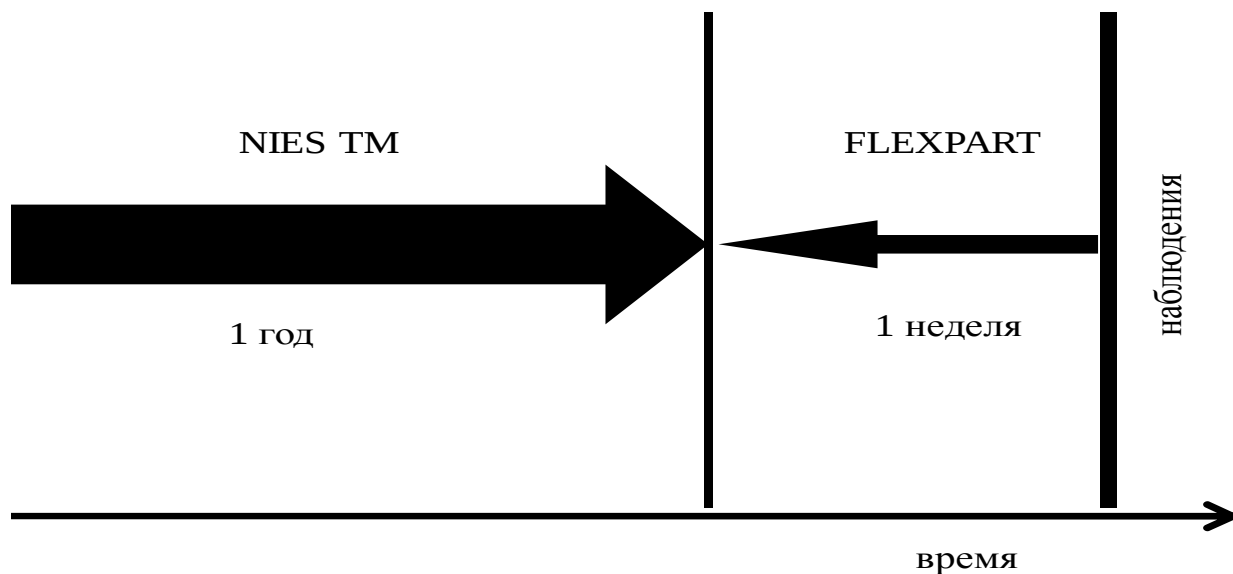


Рисунок 1 - Алгоритм работы объединенной модели

В работе показано, что сеточная модель NIES TM воспроизводит сезонный ход, но сглаживает суточные и часовые вариации. С другой стороны

результаты 7-дневного моделирования FLEXPART воспроизводят часовые вариации, но при этом не наблюдается сезонного хода.

Для описания сезонного хода с помощью лагранжевых моделей необходимо использовать траектории продолжительностью больше 3 месяцев, однако при этом возникают нарастающие ошибки для столь продолжительных траекторий и большие вычислительные затраты. Максимальные корреляции с наблюдениями наблюдаются при использовании совмещённой модели.

Далее описана методика получения и использования потоков с пространственным разрешением 1x1 км, основная идея которой заключается в использовании комбинации полей высокого разрешения (задающих пространственное распределение) с полями среднего разрешения (задающих временные вариации), а также информации о подстилающей поверхности высокого разрешения со спутникового прибора MODIS.

Кроме того, приведены модельные расчеты и сравнения с наблюдениями на станциях мониторинга с различными разрешениями используемых потоков и с различными моделями, которые показали преимущество километровых потоков над градусными и объединенной модели над отдельно эйлеровой и лагранжевой составляющими.

Результаты представлены для наземных станций наблюдений, как с применением фильтрации сезонной изменчивости, так и без неё. Фильтрация сезонной изменчивости применялась для демонстрации воспроизведения моделью кратковременной изменчивости.

В качестве меры соответствия модельных расчетов и наблюдений были выбраны коэффициенты корреляции и центрированное среднеквадратичное отклонение, рассчитанные за период одного года. Для оценки статистической значимости разницы коэффициентов корреляции использовалось Р-значение, полученное с помощью преобразования Фишера.

Станции выбраны таким образом, чтобы описывать как фоновые значения, например ст. Федоровское, расположенная в заповеднике в Тверской области, так и концентрации в сильнозагрязненных местах, таких как городская черта Лондона.

Так, в качестве примера на рисунке 2 приведено сравнение расчетов, проведенных по объединенной модели с потоками высокого разрешения, с данными измерений на станции Федоровское за 2008 год, расположенной в Тверской области, коэффициент корреляции для которой составил 0.7. Аналогичные расчеты были проведены для станций в Великобритании, Японии и России, показавшие хорошее воспроизведение моделью наблюдаемых концентраций.

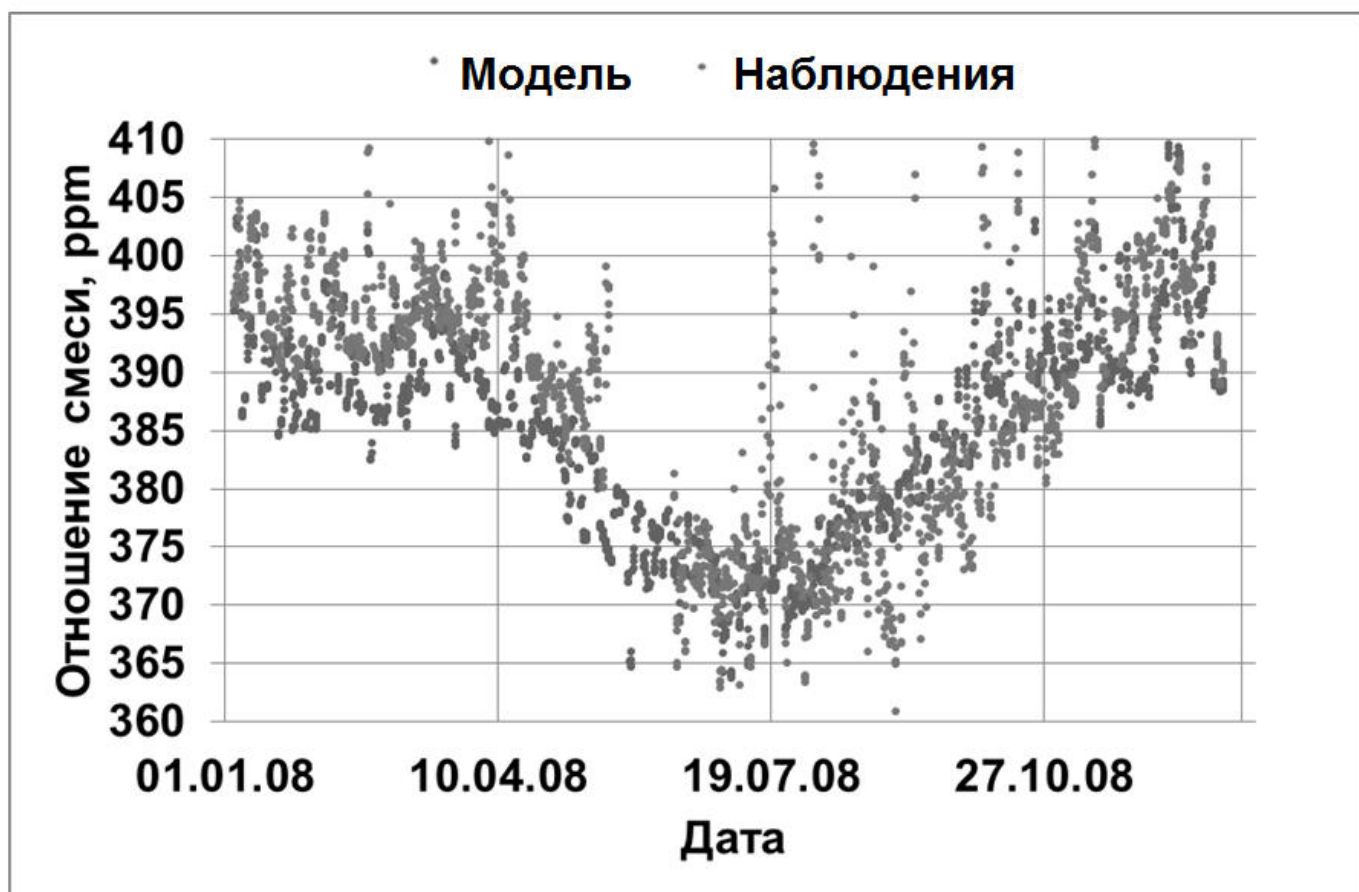


Рисунок 2 - Модельные значения концентрации CO_2 и данные измерений на ст. Федоровское для 2008 года

Для оценки возможности объединённой модели описывать вертикальную структуру распределения диоксида углерода в атмосфере были проведены расчеты и сравнения с самолетными вертикальными профилями концентрации диоксида углерода над Сургутом для 2006 года.

На рисунке 3 показаны результаты для четырех времен года (зима, весна, лето, осень), описывающие хорошее соответствие между моделью и наблюдениями. На графике для наблюдений приведена шкала погрешности измерений.

На основе модели был разработан метод по расчету среднего значения концентрации CO_2 во всей толще атмосферы (XCO_2), а также проведено сравнение со спутниковыми данными измерений GOSAT по методике PPDF-DOAS.

Расчеты для спутниковых данных аналогичны таковым для стационарных и самолетных измерений. Главное отличие заключается в начальном распределении частиц в лагранжевой модели. Методика расчета реализована при помощи начального распределения фиксированного числа частиц (использовалось значение 10000) по уровням давления в соответствии с коэффициентами, которые определяют вклад каждого уровня в общую концентрацию.

На рисунке 4 показана корреляционная связь модельных данных XCO_2 и спутниковых наблюдений, полученных в безоблачных условиях. Фильтрация спутниковых данных осуществлялась с использованием информации об облачности по данным вспомогательного прибора CAI, независимых спутниковых наблюдений и данных модельных расчётов оптической толщи перистых облаков (Глава 3).

Было промоделировано больше 120000 событий за период с июня 2009 по июль 2010 года. Коэффициент корреляции составил 0.7, а среднеквадратичное отклонение 2.2 ppm, при этом ошибка спутниковых наблюдений составляет 2.5 ppm.

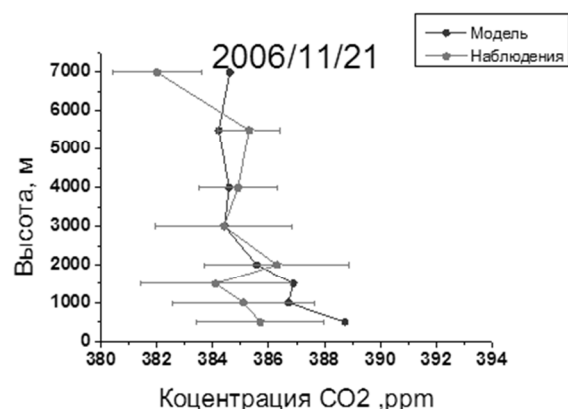
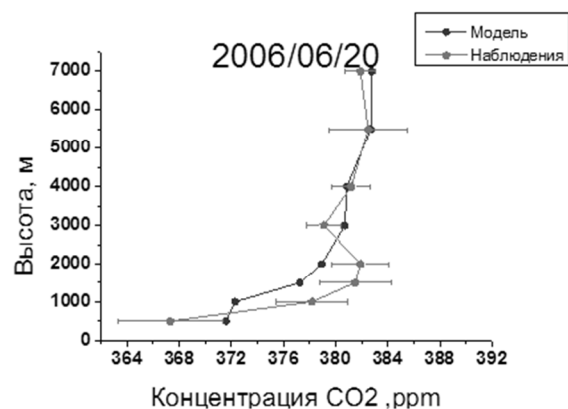
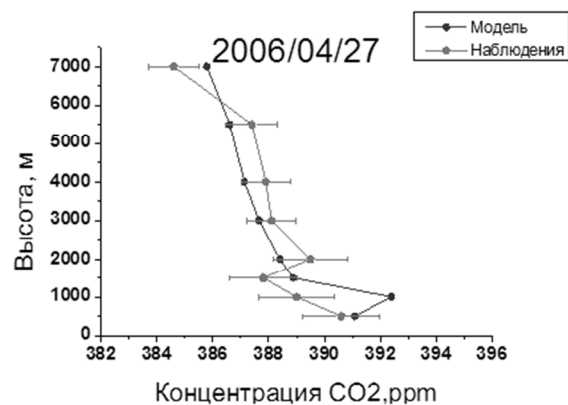
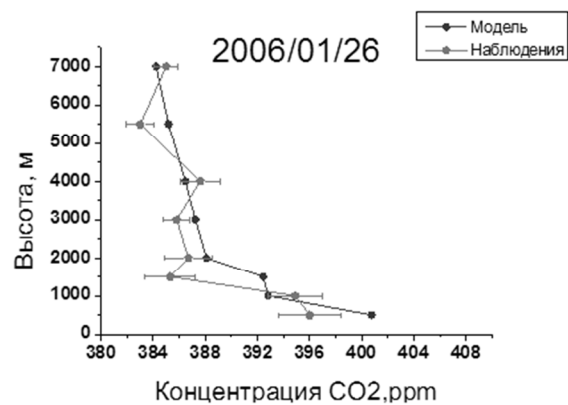


Рисунок 3 - Вертикальный профиль CO_2 на основе модельных расчетов и самолетных измерений над Сургутом для четырех времен года, для измерений указана шкала погрешностей

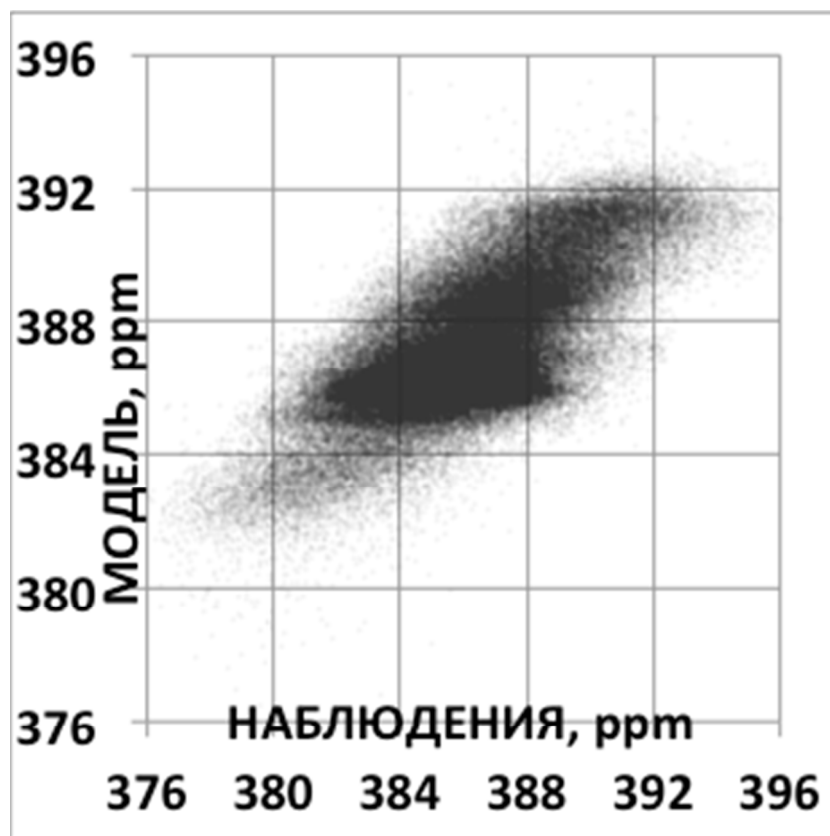


Рисунок 4 - Спутниковые измерения концентрации CO₂ и модельные расчеты для 2009-2010 года

В качестве примера практического применения разработанной объединенной модели была произведена оценка влияния антропогенных источников с территории Китая на станцию фонового мониторинга Хатерума (Япония). Для этого было произведено сравнение результатов расчетов, как с учетом эмиссий с территории Китая, так и без них.

Положение выбранной станции оказывает влияние на измеряемую на ней концентрацию, что особенно заметно в зимний период, когда происходит перенос воздушных масс с континентальной части Азии в сторону территории Японии под действием Восточноазиатского муссона.

Объединенная модель воспроизводит большинство кратковременных вариаций, которые присутствуют в наблюдениях, если же убрать выбросы, обусловленные влиянием Китая на выбранную станцию, то пропадает часть резких пиков, а также снижается значение полученных концентраций.

Если рассматривать значения корреляции между модельным данным и наблюдениями, то при удалении из рассмотрения эмиссий от Китая, они падают с 0.63 до 0.59 для 2002 года, и с 0.44 до 0.31 для 2006 года (здесь приведены значения коэффициентов корреляции для зимнего периода времени без учета сезонного хода). Отсюда можно сделать вывод, что многие кратковременные увеличения концентрации диоксида углерода на станции Хатерума обусловлены парниковыми газами, приносимыми с территории Китая.

Если построить составляющую только от антропогенных эмиссий КНР, то становится видно, что их вклад в такие увеличения является определяющим, что показано на рисунке 5, где проведено сравнение данных наблюдений и вклада в них антропогенных выбросов с территории Китая.

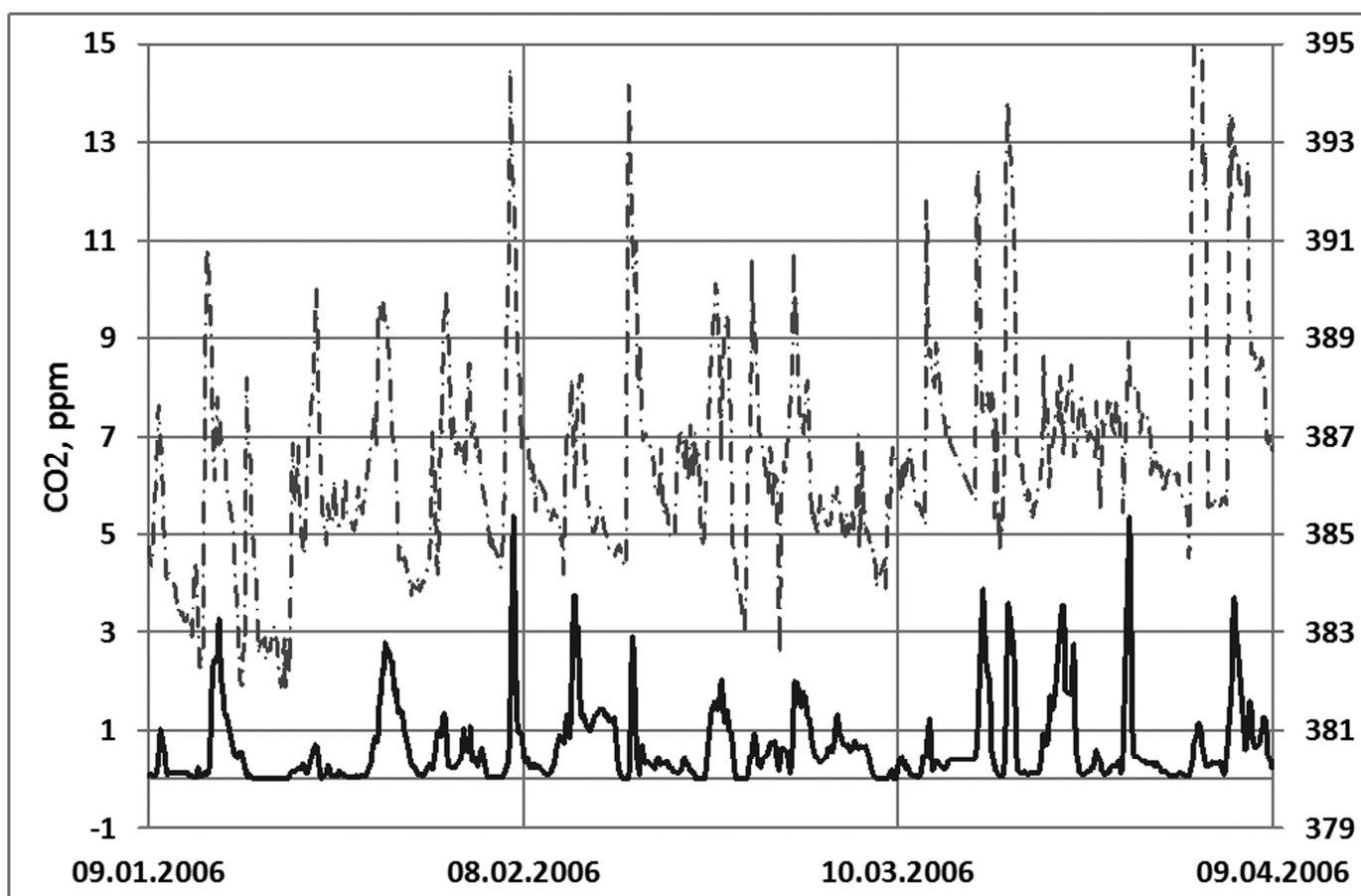


Рисунок 5 - Сравнение модельного вклада (сплошная линия) от антропогенных выбросов с территории Китая (левая ось) в наблюдаемую концентрацию CO_2 (штрих-пунктирная линия) на станции Хатерума для 2006 года (правая ось)

В третьей главе описана используемая траекторная модель TRACAO и блок параметризации перистых облаков LACM, которые являются необходимыми компонентами для расчета оптической толщи перистых облаков и их глобального распределения, информация о которых может быть использована для фильтрации спутниковых наблюдений. Для проведения корректных модельных оценок значений оптической толщины перистых облаков и влажности в области тропической тропопаузы траекторная модель была дополнена блоком параметризации перистых облаков (LACM), разработанным в университете Ланкастера (Великобритания).

Параметризация включает в себя процессы гомогенной нуклеации, нарастания размера ледяных частиц с поглощением водяного пара и гравитационного осаждения этих частиц, что в конечном итоге приводит к дегидрации воздушной массы.

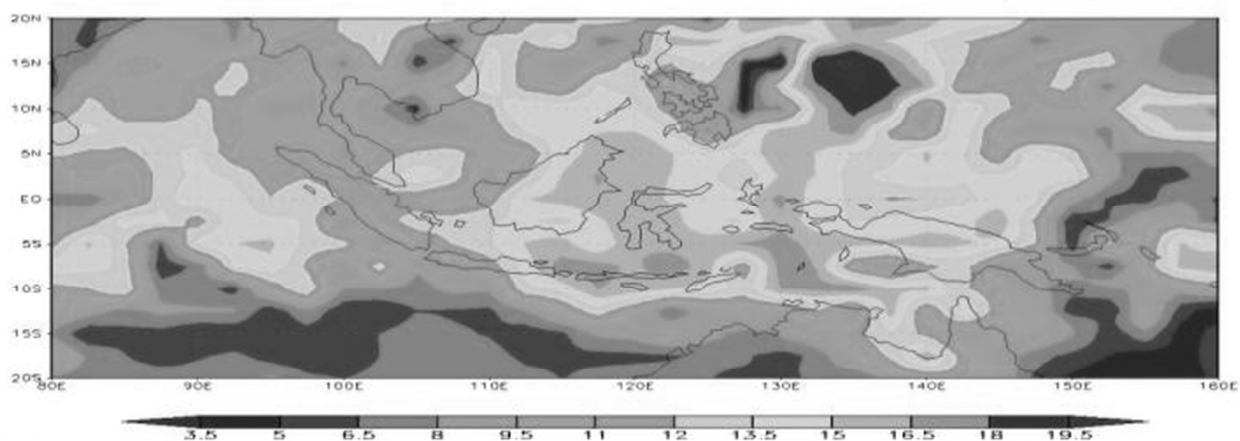
Гомогенная нуклеация возникает в условиях пересыщения, когда отношение насыщения (отношение парциального давления водяного пара к давлению насыщенного пара при данной температуре T (К)) превышает его критическое значение S_{cr} :

$$S_{cr} = 2.349 - \frac{T}{259}. \quad (2)$$

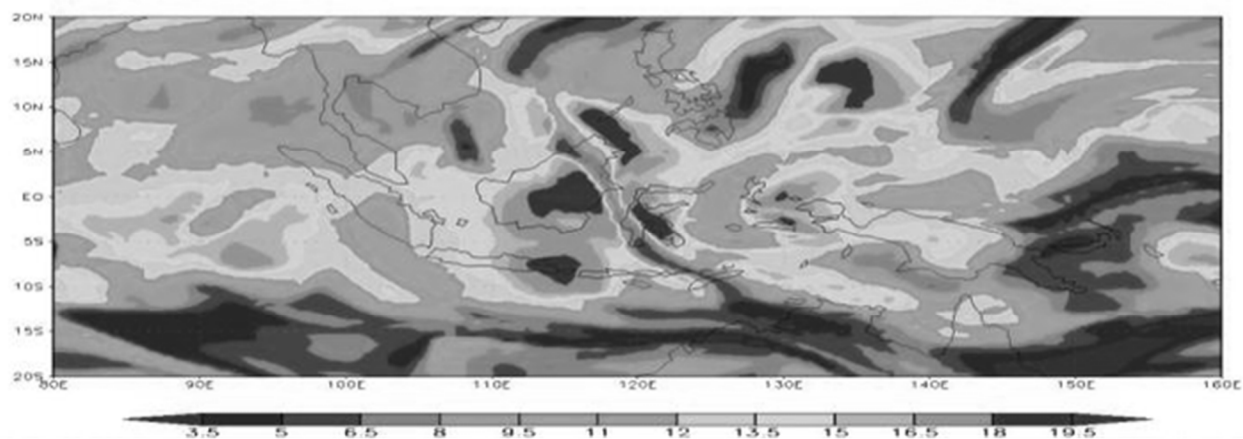
Результаты тестовых расчётов по траекторной модели, объединённой с блоком параметризации перистых облаков, представлены на рисунке 6. Здесь показаны горизонтальные распределения водяного пара (средний) и перистых облаков (нижний), полученные с помощью RDF- метода (Reverse Domain Filling – заполнение пространства обратными траекториями) и LACM. Для сравнения также представлено распределение водяного пара непосредственно по данным ECMWF (верхний).

16 Ноября 2005 6 UT 360K

ECMWF H₂O (ppmv) 2.5°x2.5°



LACM H₂O (пар) (ppmv) 0.5°x0.5°



LACM H₂O (лёд) (ppmv) 0.5°x0.5°

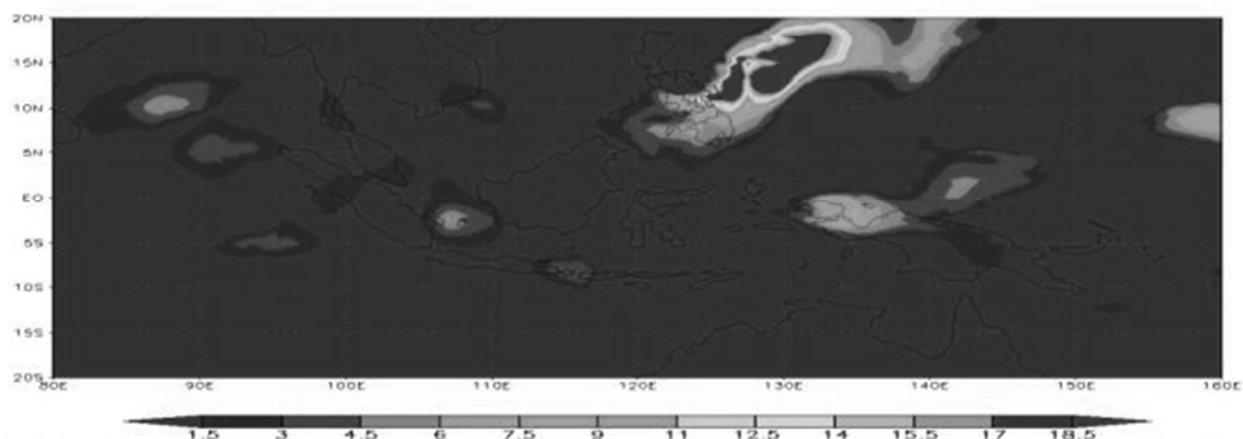


Рисунок 6 - Горизонтальные распределения водяного пара ECMWF (верхний), водяного пара LACM (средний), ледяных частиц (нижний).

После тестовых расчетов выполнена валидация полученной модели с блоком параметризации перистых облаков по данным измерения влажности в районе тропической тропопаузы. Пример использования объединённой модели TRACAO/LACM представлен на рисунке 7. Здесь показаны экспериментальный профиль водяного пара, полученный 3-го августа 2006 года с помощью гигрозонда FLASH-B над Ниамеем, Нигер (серый штрих), и профиль, реконструированный с помощью TRACAO/LACM (черная линия).

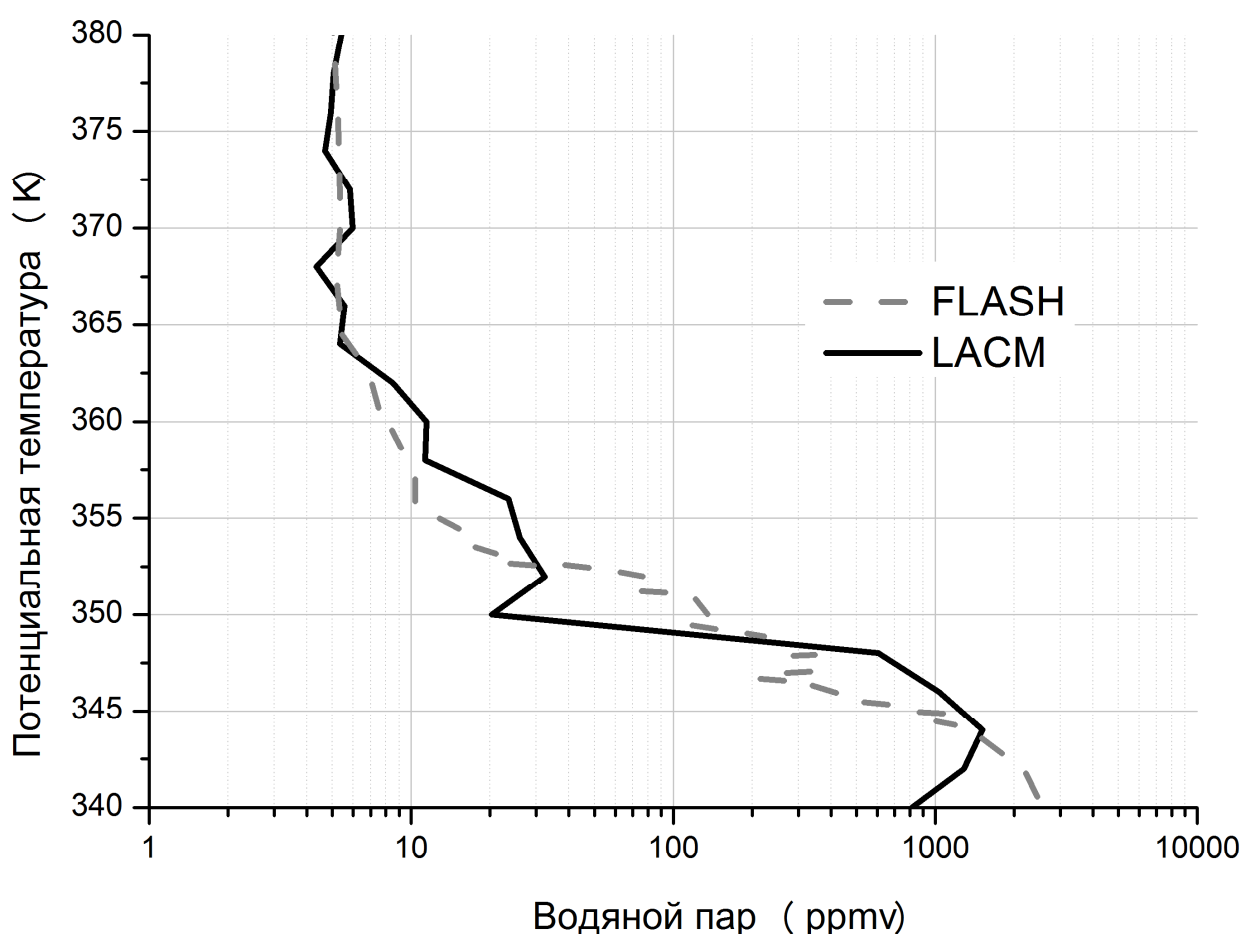


Рисунок 7 - Профили водяного пара над Ниамеем 03.08.2006: гигрометр FLASH-B (серый штрих) и профиль TRACAO/LACM (черная линия)

В процессе валидации было показано, что разработанная атмосферная траекторная модель является полностью работоспособной и позволяет получать

реалистичные значения на заданных уровнях. Однако для спутниковых измерений необходимой является информация об оптической толщине перистых облаков. Для этого был разработан алгоритм её расчета с использованием траекторной модели.

Атмосферная модель с блоком параметризации перистых облаков позволяет получить значения радиуса частиц и их концентрации на каждом выбранном уровне по высоте, из значений которых можно рассчитать экстинкцию, после чего производится её интегрирование по всем выбранным высотным слоям для вычисления оптической толщи перистых облаков.

На рисунке 8 приведены модельные глобальные карты оптической толщи перистых облаков и сравнение с данными по отражающей способности спутникового прибора MODIS.

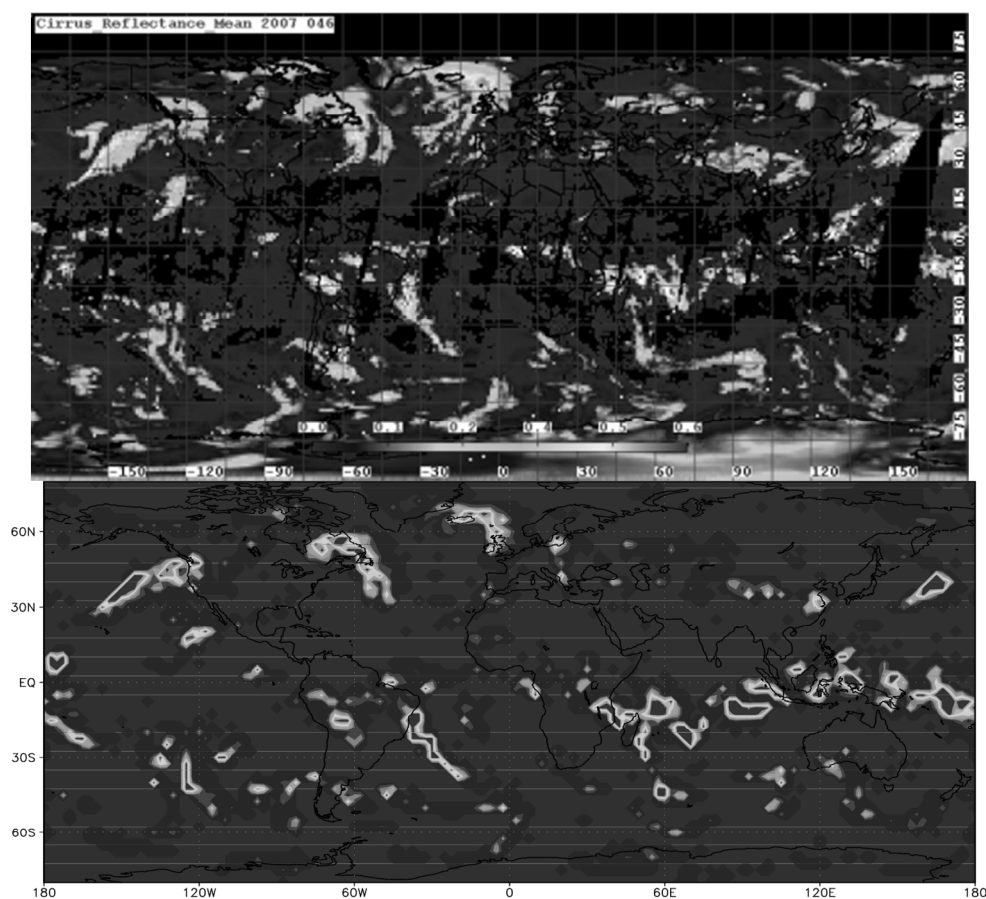


Рисунок 8 - Сравнение пространственного распределения перистых облаков, получаемого с помощью модели на сетке $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ (снизу), и отражающей способности по прибору MODIS (сверху) для 15 февраля 2007 года

Так как информация об оптической толще перистых облаков в открытом доступе отсутствовала, но существовала необходимость в валидации модельных значений по данным независимых наблюдений, было решено произвести сравнение пространственного распределения перистых облаков, получаемого с помощью модели на сетке $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$, и отражающей способности по проекту MODIS, которая соответствует их оптической толще.

Как видно из приведенных рисунков модель способна воспроизводить области возникновения перистых, которые хорошо согласуются с наблюдениями. Кроме того, модель позволяет получить непрерывную пространственную структуру, в то время как спутник дает неравномерное покрытие.

В Заключении отмечены основные результаты работы:

1. Разработаны объединенная эйлеровая/лагранжевая модель переноса атмосферных примесей и алгоритмы расчёта концентрации диоксида углерода на её основе для станций наземного мониторинга, вдоль трасс самолетов и орбиты спутника с использованием информации о приземных эмиссиях высокого разрешения (вплоть до $1 \text{ км} \times 1 \text{ км}$) антропогенного, биосферного и океанического происхождения.
2. Приведены результаты расчётов концентрации диоксида углерода на станциях наземного мониторинга, вдоль трассы самолёта и орбиты спутника и проведено сравнение с наблюдениями. При этом отмечается рост коэффициентов корреляции модельных расчетов с наблюдениями и уменьшение центрированного среднеквадратичного отклонения при использовании совмещённой модели вместо эйлеровой, дальнейшее улучшение достигается путем использования поверхностных потоков более высокого пространственного разрешения. Так для ст. Федоровское (фоновая станция) корреляция улучшается с 0.65 до 0.73, а для двух станций в Лондоне

(сильнозагрязненная городская черта) с 0.66 до 0.81 и с 0.68 до 0.78, при этом проведенные оценки показывают, что разница в коэффициентах корреляции статистически значима. Для спутниковых данных было промоделировано более 120000 событий за период с июня 2009 по июль 2010 года, коэффициент корреляции составил 0.7, а среднеквадратичное отклонение 2.2 ppm, при этом ошибка спутниковых измерений составляет 2.5 ppm.

3. В качестве приложения разработанной объединенной модели переноса атмосферных примесей проведено исследование влияния антропогенных выбросов Китая на значения концентрации на станции мониторинга, расположенной на о. Хатерума (Япония), с применением разработанной объединенной модели переноса атмосферных примесей. Значения коэффициентов корреляции между модельным данным и наблюдениями падают с 0.63 до 0.59 для 2002 года, и с 0.44 до 0.31 для 2006 года (здесь приведены значения коэффициентов корреляции для зимнего периода времени без учета сезонного хода) при удалении из рассмотрения эмиссий от Китая, что говорит об их влиянии на наблюдаемые вариации в концентрации. Показанное доминирование вклада региональных антропогенных выбросов в наблюдаемом сигнале указывает на возможности эффективного использования данных мониторинга на станции Хатерума при моделировании переноса в регионе и решении обратных задач об межгодовой изменчивости антропогенных выбросов CO₂ и других газов.
4. Построена атмосферная траекторная модель с параметризацией перистых облаков и разработан алгоритм, позволяющие получить информацию о пространственном распределении перистых облаков и скорректировать алгоритм восстановления концентрации парниковых газов при проведении спутниковых измерений.
5. Обоснован и апробирован метод применения траекторной модели с блоком параметризации перистых облаков для корректных оценок

оптической толщине и пространственного распределения перистых облаков, проведено сравнение с данными по отражающей способности, полученных со спутникового прибора MODIS, которые хорошо согласуются между собой.

6. На примере анализа данных полевых кампаний по измерению влажности в районе тропической тропопаузы проведена валидация модельных значений влажности.

Разработанный алгоритм позволяет эффективно реконструировать и анализировать мачтовые, самолётные и спутниковые наблюдения с целью последующего определения глобальных и региональных источников и стоков измеряемой компоненты

Объединённая модель активно используется для исследования переноса различных примесей как в стратосфере, так и тропосфере, для восстановления источников и стоков парниковых газов, а также уточнения имеющихся данных по эмиссиям с высоким разрешением.

Основные результаты диссертации представлены в следующих работах:

1. Варгин, П.Н. Исследование динамических процессов в период формирования и развития блокирующего антициклона над Европейской частью России в конце июня 2010 г. / П.Н. Варгин, А.Н. Лукьянов, А.В. Ганьшин // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2012. Т. 48, № 5. С. 537-557.
2. Ганьшин, А.В. Исследование процессов массообмена через тропопаузу / А.В. Ганьшин // Труды Института Прикладной Геофизики им. академика Е.К. Федорова. 2010. Т. 88. С. 118-124.
3. Моделирование вклада континентальных антропогенных источников в изменчивость концентрации CO_2 в зимний период на острове Хатерума / А.В. Ганьшин, Р.В. Журавлев, Ш.Ш. Максютлов и др. // Оптика атмосферы и океана. 2012. Т. 25. № 8. С. 727-732.
4. Оценка глобальных потоков CO_2 для 2009-2010 гг. с использованием данных наземных и спутниковых (GOSAT) наблюдений при помощи эмпирических ортогональных функций / Р.В. Журавлев, А.В. Ганьшин, Ш.Ш. Максютлов и др. // Оптика атмосф. и океана. 2013. Т. 26. № 5. С. 388-397.
5. Оценки переноса водяного пара, озона в верхней тропосфере–нижней стратосфере и потоков через тропопаузу в полевой кампании на ст. Соданкюла (Финляндия) / А.Н. Лукьянов, А.Ю. Карпечко, В.А. Юшков и др. // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2009. Т. 45. № 3. С. 316-324.
6. Присутствие вулканического пепла над территорией Российской Федерации вследствие извержения вулкана в Исландии 14-го апреля 2010 г. по данным модельных расчётов и наблюдений / А.В. Ганьшин, А.Н. Лукьянов, В.У. Хаттатов и др. // Метеорология и гидрология. 2012. № 9. С. 35-41.

7. A global coupled Eulerian-Lagrangian model and 1×1 km CO₂ surface flux dataset for high-resolution atmospheric CO₂ transport simulations / A. Ganshin, T. Oda, M. Saito et al. // Geosci. Model Dev. 2012. V. 5. P. 231-243.
8. Global high resolution atmospheric CO₂ simulation with 1x1 km surface fluxes and coupled (Eulerian/Lagrangian) model / A. Ganshin, S. Maksyutov, T. Oda et al. // Abstract A41J-04 presented at 2010 Fall Meeting. AGU. San Francisco. Calif. 13-17 Dec. 2010.
9. Simulation of CO₂ concentrations using coupled (Eulerian/Lagrangian) model with global high resolution (1km x 1km) surface fluxes / A. Ganshin, T. Oda, M. Saito et al. // European Geosciences Union General Assembly 2010. Vienna. Austria. 02-07 May 2010.
10. The Use of a High-Resolution Emission Data Set in a Global Eulerian-Lagrangian Coupled Model / T. Oda, A. Ganshin, M. Saito et al. // Lagrangian Modeling of the Atmosphere. AGU Geophysical monograph series. 2012. P.173-184.