

**Журавлев Руслан Валерьевич**

**Восстановление пространственно-временной  
структуры источников и стоков диоксида углерода по  
данным глобальных наблюдений**

Специальность 25.00.29 – физика атмосферы и гидросферы

Автореферат  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

Москва – 2012

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

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук  
Кирюшов Борис Михайлович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук  
Груздев Александр Николаевич

кандидат физико-математических наук  
Зарипов Радомир Булатович

Ведущая организация: Федеральное Государственное  
Бюджетное Учреждение «Институт Прикладной Геофизики»

Защита состоится « 01 » ноября 2012 г. в « 11:00 » часов на заседании совета Д 002.096.01 по защите докторских и кандидатских диссертаций Федерального Государственного Бюджетного Учреждения науки Института физики атмосферы им. А.М.Обухова Российской академии наук

Автореферат разослан « 01 » октября 2012 года

Учёный секретарь диссертационного совета  
кандидат географических наук

Краснокутская Л.Д.

## **Актуальность работы**

Как следует из доклада Межправительственной группы экспертов по изменению климата (IPCC, 2007), наиболее вероятной причиной наблюдаемого с середины XX- столетия возрастания глобальных средних температур является повышение концентраций антропогенных парниковых газов и прежде всего диоксида углерода ( $\text{CO}_2$ ). Было также обнаружено что не все выбросы  $\text{CO}_2$  остаются в атмосфере, так как около половины выбросов поглощаются океаном и наземными экосистемами. Рост поглощения  $\text{CO}_2$  объясняется тем, что увеличение концентрации  $\text{CO}_2$ , температуры и осадков приводит к росту продуктивности наземных экосистем, а также к увеличению поглощения  $\text{CO}_2$  океаном. Модели и оценки показывают, что рост биомассы лесов в условиях потепления климата вполне может объяснить наблюдаемые стоки углерода несмотря на наличие положительных обратных связей между потеплением и выбросами  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$  за счет усиления пожаров и таяния вечной мерзлоты в высоких широтах. Даже при наличии большого объема данных мониторинга потоков углерода в различных экосистемах, точность оценок потоков для больших регионов, стран и континентов остается недостаточно высокой для решения задач оценки успешности мер по управлению выбросами парниковых газов и калибровки моделей долгосрочного прогноза изменчивости углеродного цикла в условиях потепления климата.

Из приведенного выше можно сделать вывод, что определение величины источников и стоков парниковых газов и относительной роли в них естественных и антропогенных факторов является на сегодняшний день актуальной научной и практической задачей. Одним из способов решения этой задачи является восстановление пространственной и временной структуры интенсивности этих источников с помощью обратного моделирования и данных наблюдений. В данной области существует множество зарубежных работ, описывающих различные методики по оценке приземных потоков. До недавнего времени основной проблемой являлась сильная недоопределённость этой задачи в связи с небольшим количеством наземных станций наблюдений.

Существенным вкладом в решение проблемы является появление глобальных спутниковых данных. В частности, спутниковый проект GOSAT является первым проектом, целиком направленным на измерения парниковых газов ( $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$ ). В свете этого появилась необходимость разработки системы эффективного усвоения этих данных и методики оценки соответствующих приземных источников. В процессе работы над диссертацией были исследованы основные части поставленной задачи, а именно:

1. Рассматривалось решение прямой задачи о переносе атмосферных компонент для более точного описания временной изменчивости концентраций  $\text{CO}_2$  в точках наблюдения.

2. Разработка и валидация метода восстановления приземных источников и стоков  $\text{CO}_2$ , основанного на разложении различных видов источников по набору эмпирических ортогональных функций (ЭОФ). Использование разложения по набору ЭОФ позволяет значительно уменьшить размерность решаемой задачи без заметной потери точности.

3. Разработка системы последовательного усвоения данных наблюдений как стационарных так и спутниковых или самолетных.

### **Целью данной работы являлось:**

Разработка и валидация метода восстановления приземных источников и стоков  $\text{CO}_2$  на основе эмпирических ортогональных функций по данным глобального наблюдения содержания  $\text{CO}_2$  в атмосфере, а также применение разработанного метода для количественной оценки источников и стоков  $\text{CO}_2$  в глобальном масштабе.

### **В рамках данной работы решались следующие задачи:**

1. Построение численной схемы переноса высокого порядка точности по пространству для эйлеровой модели, а также исследование возможности использования совмещенной эйлеровой-лагранжевой (имеется в виду

использование комплекса из двух моделей) модели для описания временной изменчивости концентраций  $\text{CO}_2$  в точках наблюдений.

2. Разработка метода восстановления приземных источников и стоков  $\text{CO}_2$  с использованием ЭОФ.

3. Валидация разработанного метода восстановления приземных источников и стоков  $\text{CO}_2$ .

4. Разработка алгоритма решения задачи восстановления пространственно-временной изменчивости источников и стоков  $\text{CO}_2$  при помощи совмещенной эйлеровой-лагранжевой модели.

5. Создание системы последовательного усвоения данных стационарных и спутниковых наблюдений.

6. Создание карт восстановленных приземных источников и стоков  $\text{CO}_2$  для периода времени 2009-2010 гг. по спутниковым и стационарным наблюдениям.

#### **Научная новизна работы состоит в следующем:**

- Впервые объединенная эйлеровая-лагранжевая модель была использована для решения задачи восстановления приземных источников и стоков  $\text{CO}_2$ .

- Разработан метод восстановления приземных источников и стоков  $\text{CO}_2$  при помощи эмпирических ортогональных функций. Основными преимуществами этого метода являются физически обоснованная пространственная гладкость восстановленных источников и стоков и вычислительная эффективность.

- Получены глобальные среднемесячные оценки источников и стоков  $\text{CO}_2$  с пространственным разрешением  $1 \times 1$  градус с использованием спутниковых наблюдений GOSAT и стационарных колбовых наблюдений за период времени 2009-2010 гг.

### **Достоверность полученных результатов.**

- Решение прямой задачи было проверено по тестам с использованием аналитических полей ветров и концентраций, а также были проведены сравнения с данными стационарных наблюдений.

- Результаты восстановления приземных источников и стоков CO<sub>2</sub> сравнивались с ранее полученными в ходе ряда международных проектов, получено хорошее соответствие.

- Модельные концентрации CO<sub>2</sub>, полученные с использованием оптимизированных источников и стоков CO<sub>2</sub>, сравнивались с независимыми данными мачтовых наблюдений в Сибири для 2009-2010 гг.

**Практическое значение полученных результатов заключается в том, что разработанные системы и методы позволяют:**

- Оценивать приземные источники и стоки CO<sub>2</sub> с разрешением 1°×1° на глобальном и региональном масштабе.

- Получать информацию о сезонной и межгодовой изменчивости выбросов на глобальном и региональном уровне. А также получать эту информацию в оперативном режиме.

- Исследовать другие атмосферные компоненты на предмет оценки их приземных выбросов и осуществлять мониторинг их состояния.

### **Апробация работы:**

Основные результаты, представленные в диссертации, докладывались на всероссийских и международных ежегодных конференциях и школах в Европе, Японии и США, а также научных семинарах Центральной Аэрологической Обсерватории. По теме диссертации опубликовано 6 печатных работ, все из них – в изданиях, рекомендуемых в ВАК.

### **Выносятся на защиту:**

- Метод восстановления приземных источников и стоков CO<sub>2</sub>.
- Система последовательного усвоения данных измерений концентрации CO<sub>2</sub> или других атмосферных компонент.
- Результаты восстановления приземных источников и стоков CO<sub>2</sub> по спутниковым и стационарным наблюдениям. Количественные оценки глобальных источников и стоков CO<sub>2</sub>.

### **Структура диссертации и содержание работы**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и одного приложения, изложенных на 133 страницах, в том числе 47 рисунков и 6 таблиц, в списке цитируемой литературы 116 наименований.

Во **введении** обоснована актуальность темы, сформулированы цели и задачи диссертации.

В **первой главе** приведен общий обзор работ, посвященных проблеме оценки приземных источников и стоков CO<sub>2</sub>, а также описана общая постановка задачи.

В настоящее время в задаче определения источников и стоков парниковых газов используются два взаимодополняющих подхода. Первый подход «снизу-вверх» (bottom up) состоит в объединении и осреднении на региональном уровне (100-1000 км) локальных потоков атмосферной компоненты, оцененных с помощью наземных, мачтовых и самолётных измерений, а также инвентаризации промышленных выбросов. Основным недостатком такого подхода является низкая плотность и пространственная неоднородность точек наблюдения в интересующем нас регионе и ошибки экстраполяции на региональные и глобальные масштабы.

Второй подход «сверху-вниз» (top down) основывается на использовании обратного моделирования, в котором по глобальному пространственно-временному распределению концентрации какой-либо компоненты в атмосфере

определяются источники и стоки этой компоненты. Для реализации такого подхода используются данные наземных, самолётных и спутниковых наблюдений, а также данные модельных расчётов. Местоположение и интенсивность источников и стоков (потоков) интересующей нас атмосферной компоненты определяются из условия минимизации разности модельных и измеренных значений концентрации этой компоненты.

В данной работе рассматривается и решается задача по восстановлению приземных источников и стоков  $\text{CO}_2$  при помощи подхода «сверху-вниз». При таком подходе для решения задачи необходимы:

- Данные наблюдений содержания  $\text{CO}_2$  (станционные, самолетные или спутниковые).

- Трёхмерные численные модели, позволяющие адекватно описывать процессы переноса в атмосфере (моделировать временную изменчивость концентраций атмосферных компонент в точках наблюдений).

- Априорная информация о глобальном пространственном распределении источников и стоков интересующей нас атмосферной компоненты.

Таким образом основную задачу восстановления источников и стоков  $\text{CO}_2$  можно разбить на несколько основных подзадач, которые будут влиять на качество получаемых оценок:

- Обработка данных наблюдений (содержание  $\text{CO}_2$  в атмосфере)
- Построение трёхмерной транспортной модели (перенос  $\text{CO}_2$  в атмосфере)
- Получение априорных данных о распределении источников/стоков  $\text{CO}_2$  и способы их коррекции

- Выбор и реализация метода решения обратной задачи и восстановление приземных источников и стоков  $\text{CO}_2$

Также отдельно рассматриваются составные части задачи, описанные выше. Поскольку в данной диссертации используются спутниковые данные, то представляется логичным описать существующие спутниковые проекты и используемые способы измерений.



**Вторая глава** посвящена моделированию процесса переноса в атмосфере. В данной главе представлено описание двух типов моделей эйлеровой и лагранжевой. Каждый из двух типов моделей имеет свои достоинства и недостатки. В эйлеровых моделях значения концентраций атмосферных составляющих задаются в ячейках пространственных трехмерных сеток фиксированного размера. При этом нас интересует только изменение полной концентраций со временем в каждой отдельно взятой ячейке. При таком подходе точность модельных расчетов зависит от пространственного разрешения модели, поскольку предполагается, что внутри ячейки концентрация распределена равномерно (данное приближение приводит к так называемой численной диффузии). Однако данные модели хорошо описывают процессы в глобальном масштабе. Альтернативный (лагранжев) подход основан на интегрировании уравнения непрерывности для каждой атмосферной компоненты вдоль траектории движения фиксированной воздушной частицы независимо от состояния других областей среды. Стоит также отметить, что у лагранжевых моделей, основанных на движении отдельных частиц, отсутствует численная диффузия (ошибка, связанная не с какими-то физическими процессами, а со свойствами выбранной численной схемы и дискретизацией пространства). Как показывают исследования, для приемлемых расчетов по лагранжевым моделям требуются очень продолжительные траектории, которые требуют значительных вычислительных мощностей. Кроме того таким траекториям не всегда можно доверять, ввиду того, что со временем нарастает ошибка положения воздушной частицы в пространстве, связанная с такими ошибками как: ошибка интерполяции, неточность параметризации и др.

Ключевым элементом эйлеровой численной транспортной модели является используемая в ней схема переноса. В данной работе была реализована схема переноса на основе метода сохранения моментов второго порядка, описанного Пратером. В данной численной схеме распределение концентрации атмосферных компонент  $f(x, y, z)$  внутри каждой ячейки пространственной

сетки представляется в виде полинома второго порядка по каждой оси трехмерной сетки  $(x, y, z)$ :

$$f(x, y, z) = a_0 + a_x x + a_{xx} x^2 + a_y y + a_{yy} y^2 + a_z z + a_{zz} z^2 + a_{xy} xy + a_{yz} yz + a_{xz} xz \quad (1)$$

$$0 \leq x \leq X, 0 \leq y \leq Y, 0 \leq z \leq Z, V = XYZ$$

где  $x, y, z$  – координаты точки внутри ячейки,  $a_i$  – коэффициенты при соответствующих степенях.

В процессе переноса на временном шаге в каждой ячейке происходит изменение распределения интересующей нас компоненты в соответствии с выведенными аналитическими формулами. Данная схема переноса была реализована для работы с регулярными и нерегулярными сетками на сфере, после чего были проведены расчеты с тестовыми аналитическими полями.

Далее приведено описание лагранжевой дисперсионной мульти-траекторной модели FLEXPART, которая впоследствии также использовалась в данной работе.

Чтобы избежать или минимизировать недостатки каждого вида моделей был выбран 2-х шаговый алгоритм, в котором первоначальные расчеты проводятся на грубой сетке эйлеровой модели, а затем используется лагранжевая дисперсионная модель на коротком промежутке по времени, притягивающая соответствующие концентрации от трехмерной сетки к точке наблюдения и собирая локальные приземные источники с двумерной сетки. Таким образом была реализована совмещенная эйлеровая-лагранжевая транспортная модель GELCA (Global Eulerian-Lagrangian Coupled Atmospheric model / Гобальная эйлеровая-лагранжевая совмещенная модель атмосферы).

На рис. 1 представлен сезонный ход вариаций концентрации  $\text{CO}_2$  (отклонений от среднегодового значения) по данным наблюдений и результатов расчётов по различным типам моделей за 2002 год для станции Хатерума в Японии ( $24^\circ$  с.ш.,  $123.8^\circ$  в.д.). При этом использовались одни и те же данные о приземных источниках  $\text{CO}_2$  (антропогенные эмиссии, биосферные потоки и

океанические потоки) и метеорологические данные. При расчетах применялись три модели: эйлеровая модель NIES TM; лагранжевая модель FLEXPART; совмещенная эйлеровая-лагранжевая модель GELCA (Global Eulerian-Lagrangian Coupled Atmospheric model). Из рисунка видно, что NIES TM воспроизводит сезонный ход, но сглаживает суточные и часовые вариации (рис. 1, верхний рисунок). Также на рис. 1 показаны сравнения наблюдений с результатами 7-дневного (длина обратных траекторий) моделирования FLEXPART (рис. 1, средний рисунок). Здесь, наоборот, воспроизводятся часовые вариации, но не наблюдается сезонного хода. Появление сезонного хода при использовании лагранжевой модели FLEXPART можно достигнуть, используя обратные траектории продолжительностью от 3х месяцев, однако при этом возникают ошибки, указанные в главе 2. Максимальные значения корреляции результатов расчетов с наблюдениями достигаются при использовании совмещенной модели (рис. 1, нижний рисунок). Использование совмещенной модели при решении задачи восстановления приземных источников и стоков CO<sub>2</sub> являлось одним из основных нововведений представленной работы. Продолжительность обратных траекторий FLEXPART в данном случае варьируется в зависимости от удаленности источников и стоков рассматриваемой компоненты от точки наблюдения.

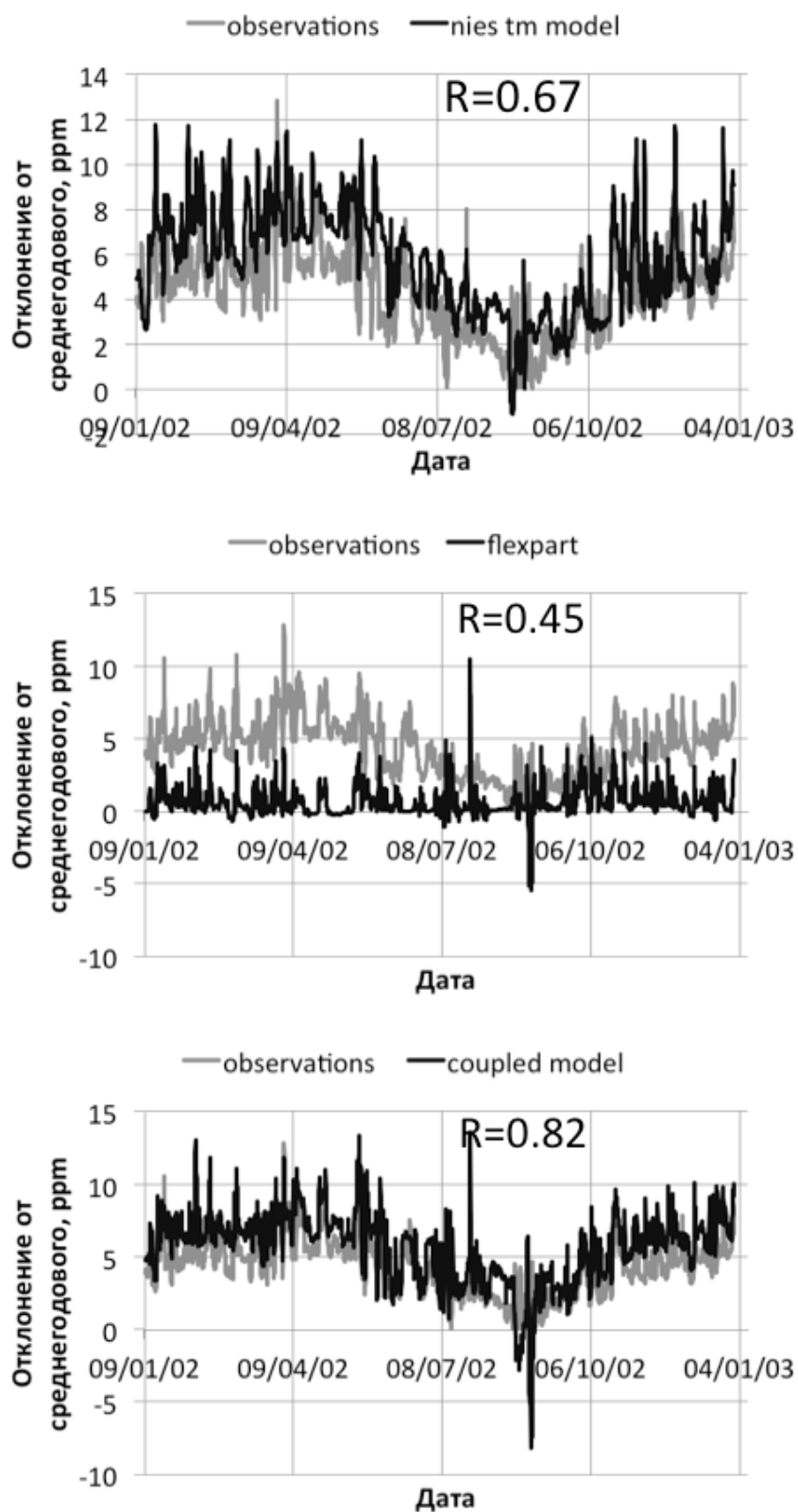


Рис. 1. Сравнение наблюдений 2002 года за концентрацией  $\text{CO}_2$  на станции Хатерума для трех видов моделей: эйлерова модель NIES TM (верхний рисунок), лагранжевая модель FLEXPART (средний рисунок), совмещенная эйлерова-лагранжевая модель GELCA (нижний рисунок). Соответствующий коэффициент корреляции  $R$  приведён на каждом рисунке

Проведенные исследования показывают, что оптимальная продолжительность обратных траекторий для модели FLEXPART два дня, что уменьшает время расчетов. Это связано с тем, что, например, мачтовые измерения сохраняют однозначную связь с источниками на протяжении не более 1.5 дней (из-за сильного замешивания в погранслое) и все эти источники расположены внутри области, не превышающей  $1000 \times 1000$  км.

В **третьей главе** приведен обзор методик по восстановлению приземных источников и стоков  $\text{CO}_2$  по данным глобальных наблюдений. Описываются преимущества и недостатки существующих методов. Как альтернативный метод предлагается использование эмпирических ортогональных функций (ЭОФ). Главная идея заключается в представлении приземных источников и стоков в виде линейной комбинации ЭОФ с соответствующими коэффициентами.

$$flux = flux_{pri} + \sum_{i=1}^N \alpha_i EOF_i \quad (2)$$

где  $flux_{pri}$  – вектор фиксированных глобальных полей эмиссий для соответствующего вида источника размерности  $m$  (число ячеек двумерной сетки, на которой заданы эмиссии),  $flux$  – скорректированное поле эмиссий,  $EOF_i$  – эмпирические ортогональные функции той же размерности, что и априорные и апостериорные поля,  $\alpha_i$  – коэффициенты при соответствующих ЭОФ,  $N$  – количество ЭОФ. В данном случае каждая ЭОФ представляет собой глобальное двумерное поле (рис. 2). С математической точки зрения данный подход выглядит как проекция  $m$ -мерного вектора на  $N$ -мерный ортогональный базис. Комбинация содержит информацию о климатологической пространственной изменчивости выбросов, а также информацию о корреляции между различными ячейками в глобальном масштабе, причем значимость этой корреляции можно оценить по соответствующему собственному значению. Использование данной методики приводит к получению гладких поверхностных потоков в глобальном масштабе. Также преимуществом данного подхода является то, что, как описано в диссертации, для точного

описания поверхностных потоков  $\text{CO}_2$  требуется относительно небольшое число ЭОФ.

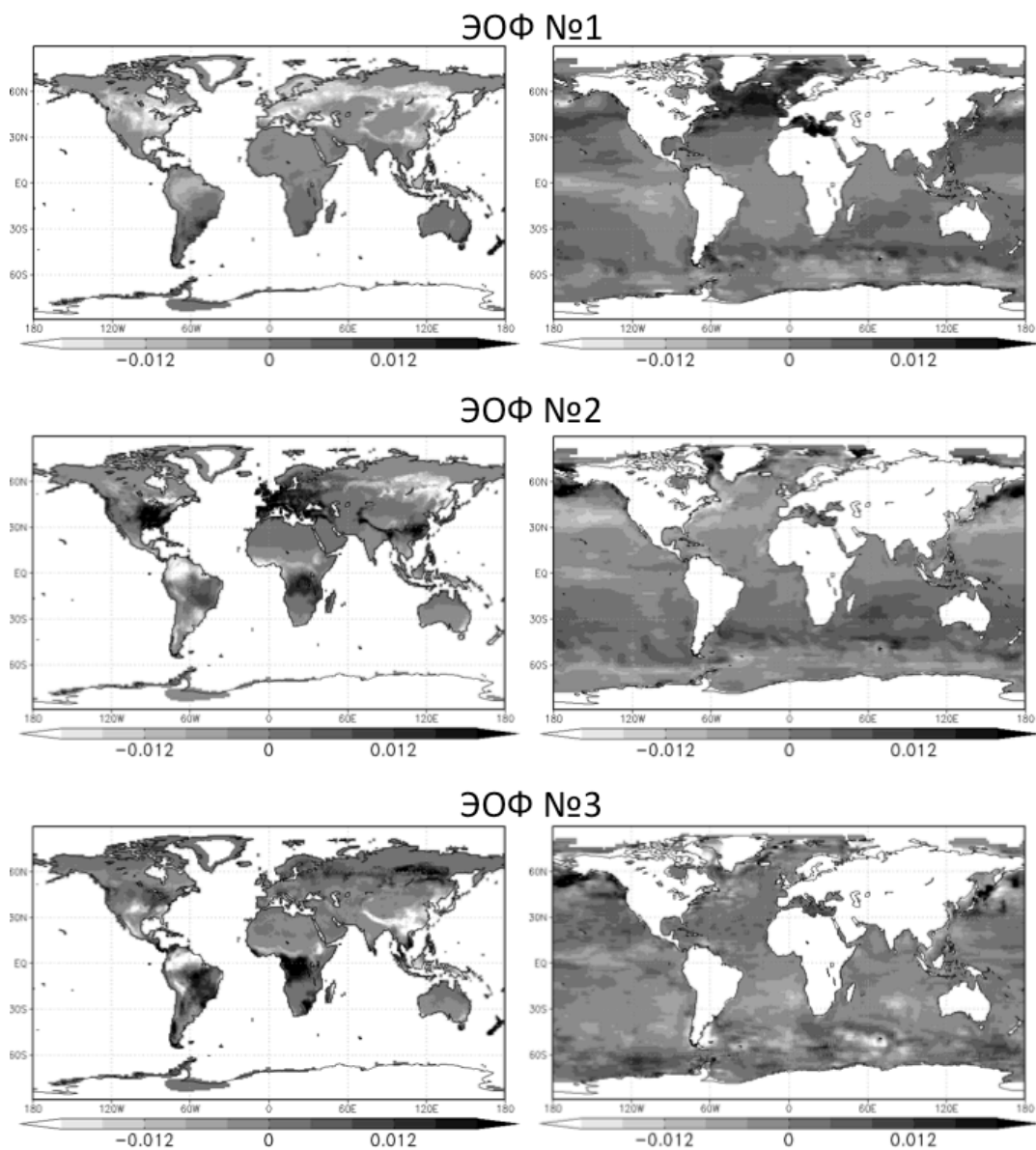


Рис. 2. Карты первых 3-х ЭОФ для биосферы (слева) и океана (справа), упорядоченных по соответствующему собственному числу

Приводится описание процедуры расчета ЭОФ при помощи SVD разложения. В процессе работы над диссертацией было рассчитано два различных набора ЭОФ. Первый набор был получен из базы данных о приземных источниках и стоках  $\text{CO}_2$  CarbonTracker (выпуск 2009 года). Второй

набор рассчитывался по биосферной модели VISIT (Vegetation Integrative Simulator for Trace gases) и океанической модели OTTM (Offline ocean Tracer Transport Model) с системой усвоения данных 4D-var. При определении оптимального числа ЭОФ рассматривалось воспроизведение пространственной и временной изменчивости приземных потоков CO<sub>2</sub>. Суть расчетов заключалась в следующем, сначала необходимо было определить пространственную и временную изменчивость для оригинальных потоков CO<sub>2</sub>, а затем тоже самое для потоков, восстановленных при помощи ограниченного набора ЭОФ. Далее между двумя полученными величинами (для оригинальных потоков и восстановленных) рассчитывалась относительная ошибка. Результаты расчетов для двух наборов ЭОФ представлены на рис. 3(а,б) и рис. 4(а,б) соответственно.

На рис. 3а и рис. 3б можно увидеть, что поля разложенные по ЭОФ показывают такую же пространственную изменчивость, как и оригинальные поля (верхний рисунок) для двух видов источников. Что же касается временной изменчивости, то в основном различие составляет около 10%, кроме области пустыни Сахары для суши. Это возможно связано с тем, что этот регион является «выколотым» в потоках CarbonTracker.

Для второго набора ЭОФ (рис. 4(а,б)) можно увидеть, что отличия в пространственной изменчивости не превышают 5% (рис. 4а). Для временной изменчивости отличия в среднем также не превышают 5% (рис. 4б).

Из уравнения (2) можно сделать вывод, что задача оценки приземных источников CO<sub>2</sub> при помощи ЭОФ сводится к определению соответствующих коэффициентов  $\alpha_i$  при каждой ЭОФ.

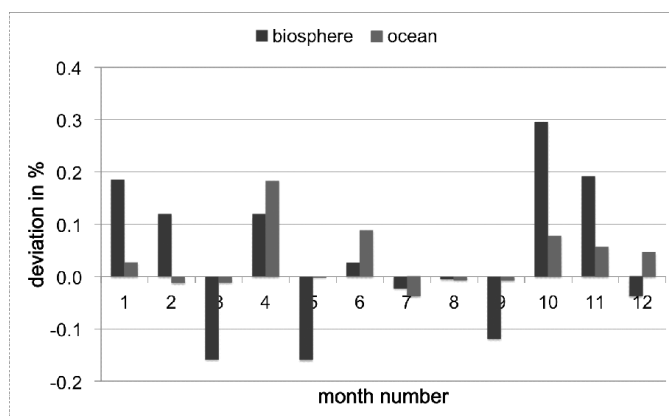


Рис. 3а. Относительная ошибка (в %) для пространственной изменчивости двух видов источников (суша и океан), между стандартным отклонением для оригинальных и стандартным отклонением для восстановленных по ЭОФ полям в зависимости от месяца

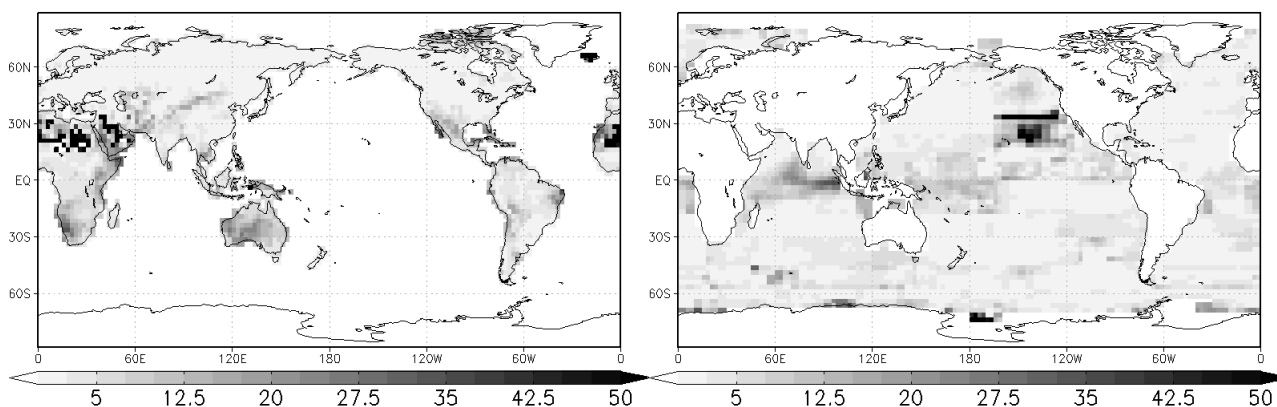


Рис. 3б. Относительная ошибка (в %) для временной изменчивости двух видов источников между стандартными отклонениями для оригинальных полей и восстановленных по ЭОФ для каждой точки двумерной сетки. Слева/снизу – биосферные поля, справа/снизу – океанические поля (70 ЭОФ)

В четвертой главе обсуждаются существующие методики по решению обратной задачи, после чего делается выбор оптимальной и достаточной методики для нашей конкретной задачи. В данном случае был выбран фильтр Калмана, поскольку наша задача линейна. Используя традиционный Байесовый подход, составляется функционал, называемый «невязкой», который состоит из двух частей: отличие между априорной оценкой эмиссий и истинным



значением эмиссий; отличие между смоделированными наблюдениями и реальными наблюдениями:

$$F(x) = \frac{1}{2}(\mathbf{y} - \mathbf{H}\mathbf{x})^T \mathbf{R}^{-1}(\mathbf{y} - \mathbf{H}\mathbf{x}) + \frac{1}{2}(\mathbf{x} - \mathbf{x}_p)^T \mathbf{B}^{-1}(\mathbf{x} - \mathbf{x}_p) \quad (3)$$

где  $\mathbf{y}$  – вектор наблюдений размерности  $n$ ,  $\mathbf{x}_p$  – априорная оценка для приземных потоков размерности  $m$ ,  $\mathbf{x}$  – вектор неизвестных приземных потоков, который мы собираемся оценить, размерности  $m$ ,  $\mathbf{H}$  – оператор модели (размерности  $n \times m$ ), который переводит вектор потоков в вектор наблюдений,  $\mathbf{R}$  – матрица ковариации для наблюдений (размерности  $n \times n$ ),  $\mathbf{B}$  – матрица ковариации для априорной оценки вектора приземных потоков (размерности  $m \times m$ ). При минимизации данного функционала ищется точка, в которой выполняется следующее соотношение:

$$\frac{\partial F(x)}{\partial x} = 0 \quad (4)$$

Решением данного уравнения в случае линейности задачи и гауссовой статистики будет следующая система уравнений:

$$\mathbf{x} = \mathbf{x}_p + \mathbf{B}\mathbf{H}^T(\mathbf{H}\mathbf{B}\mathbf{H}^T + \mathbf{R})^{-1}(\mathbf{y} - \mathbf{H}\mathbf{x}_p) \quad (5)$$

$$\mathbf{A} = (\mathbf{I} - \mathbf{K}\mathbf{H})\mathbf{B}$$

где  $\mathbf{A}$  – апостериорная матрица ковариации для вектора состояния.

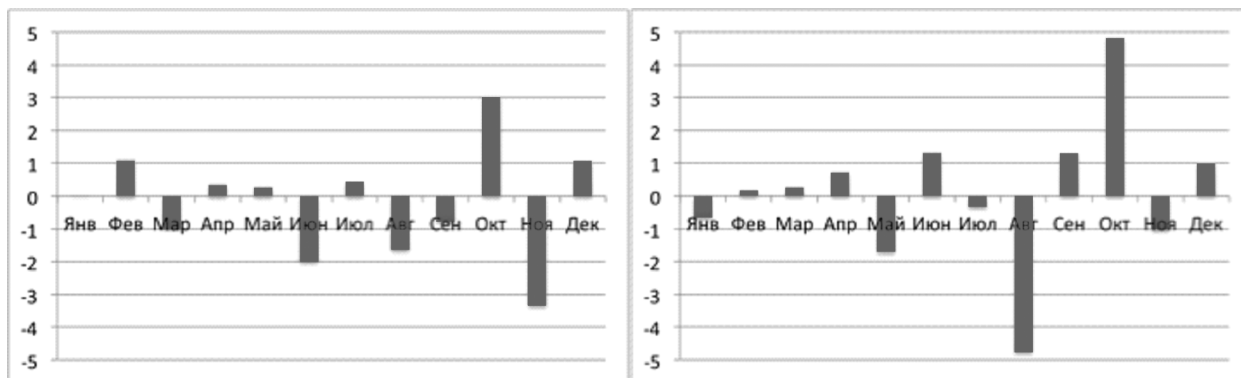


Рис. 4а. Относительная ошибка (в %) для пространственной изменчивости двух видов источников, между стандартным отклонением для оригинальных полей и стандартным отклонением для восстановленных по ЭОФ полям в зависимости от месяца (слева – биосфера, справа – океан).

Представлены результаты экспериментов по определению приземных источников и стоков  $\text{CO}_2$ . Сначала описываются результаты расчетов по тестовому эксперименту, который показывает на сколько выбранный математический аппарат позволяет правильно решать задачу по оценке приземных источников и стоков. Данный эксперимент показал хорошие результаты, после чего ставились эксперименты с реальными данными наблюдений.

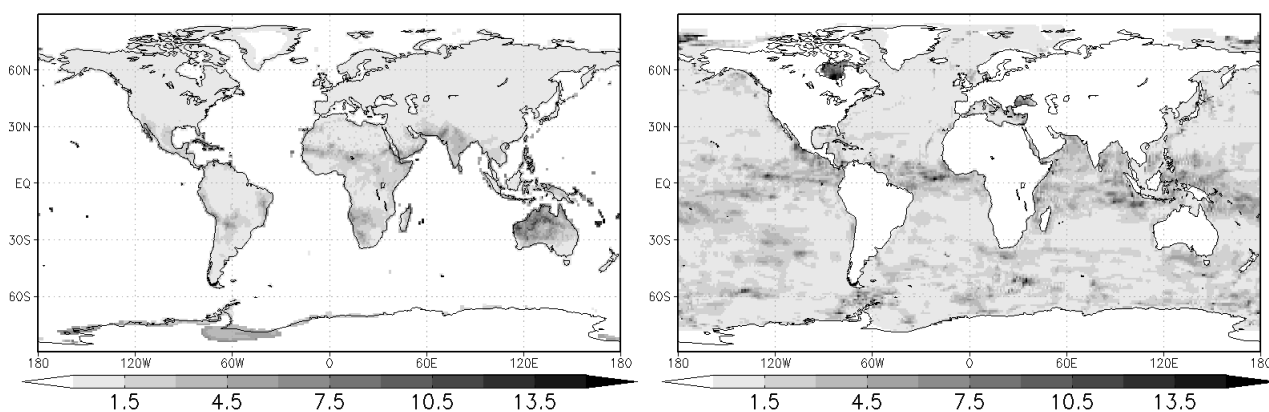


Рис. 4б. Относительная ошибка (в %) для временной изменчивости двух видов источников между стандартными отклонениями для оригинальных полей и восстановленных по ЭОФ для каждой точки двумерной сетки. Слева – биосферные поля, справа – океанические поля (170 ЭОФ)

Чтобы провести валидацию разработанного метода по восстановлению приземных источников и стоков  $\text{CO}_2$ , необходимо сравнить результаты, получаемые в нашем случае, с результатами полученными ранее. Для этого использовались результаты международного эксперимента по сравнению транспортных моделей TransCom3, точнее второй уровень этого эксперимента, в котором сравнивались решения обратных задач для различных численных моделей переноса. Данный эксперимент поставлен для оценки внутригодовой изменчивости глобальных источников и стоков  $\text{CO}_2$ . В нем использовался региональный метод оценки потоков, в котором вся поверхность Земли делится на непересекающиеся регионы, с использованием 11 регионов для суши и 11

регионов для океана. Результаты сравнения показали, что оценки приземных источников и стоков, полученные при помощи ЭОФ, хорошо соотносятся с полученными ранее результатами по другим моделям. Результаты сравнения по трем критериям представлены на рис. 5. Видно, что результаты, полученные с использованием эйлеровой модели NIES и двух различных методик коррекции потоков CO<sub>2</sub> (региональный подход NIES(slt) и ЭОФ-метод NIES(EOF)), схожи (два последний столбца). При использовании ЭОФ наблюдается немного большая средняя по модулю ошибка, но меньшее среднеквадратичное отклонение и систематическая ошибка.

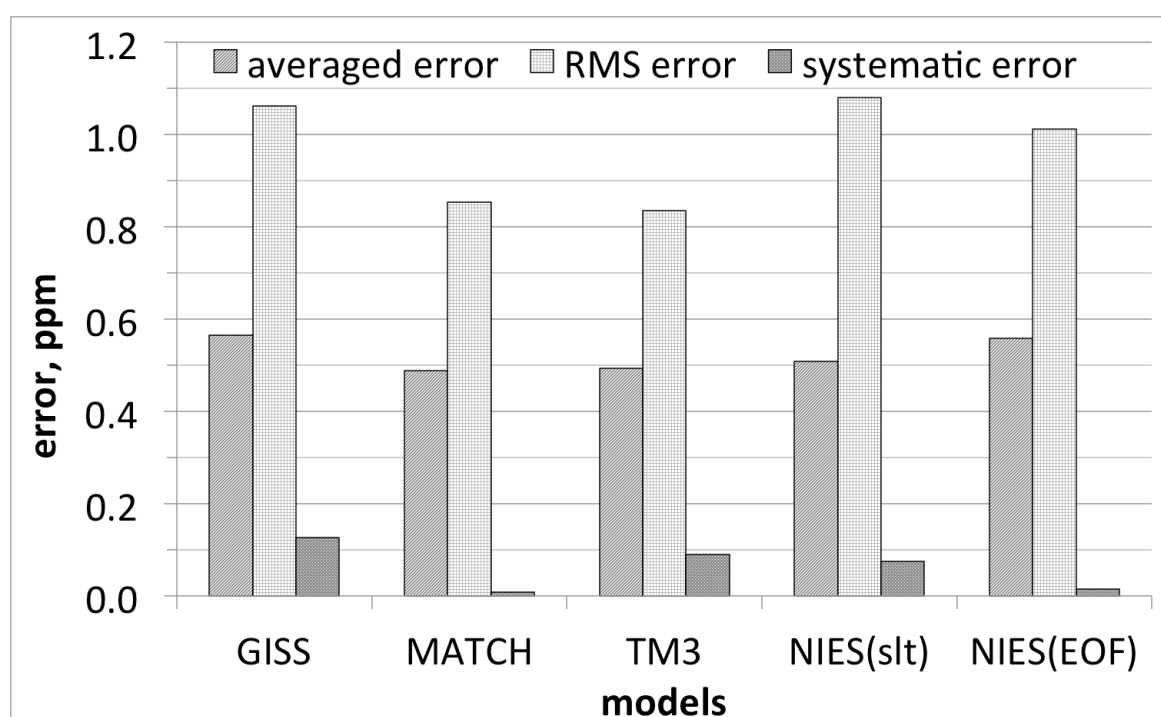


Рис.5. Средняя по модулю ошибка, среднеквадратичное отклонение и систематическая ошибка между наблюдениями и модельными расчетами с восстановленными потоками CO<sub>2</sub> для различных моделей, участвовавших в эксперименте ТЗ. Результаты описанные в данной работе обозначены «NIES (EOF)»

В четвертой части главы 4 представлены результаты расчетов по восстановлению приземных среднемесячных источников и стоков CO<sub>2</sub> с

использованием стационарных измерений (колбовой сети наблюдений NOAA) и спутниковых измерений GOSAT. В представленной работе использовались независимые данные о содержании CO<sub>2</sub> в столбе (XCO<sub>2</sub>), полученные при помощи PPDF-DOAS (Path length Probability Density function с применением Differential Optical Absorption Spectroscopy) и стандартный продукт L2v02.xx (рис. 6). В процессе работы были разработаны методики обработки спутниковых данных при помощи совмещенной эйлеровой-лагранжевой модели, которые позволяют сравнивать их значения с модельными с учетом весовой функции в каждой точке наблюдения. Также для работы с большим количеством спутниковых наблюдений (порядка 5000 событий в месяц) была разработана система последовательного усвоения данных на основе фильтра Калмана с фиксированным окном задержки (Fix-Lag Kalman Smoother). Данная система была создана и установлена в ЦАО, после чего было проведено несколько экспериментов по решению обратной задачи с разными наборами наблюдений: только стационарные наблюдения (*surf*); только спутниковые данные, полученные по PPDF-DOAS (*PPDF*); только спутниковые данные, полученные по L2v02.xx (*L2v02.xx*); комбинация стационарных измерений и спутниковых данных по PPDF (*surf+PPDF*); комбинация стационарных измерений и спутниковых данных по L2v02.xx (*surf+L2v02.xx*). Поля восстановленных потоков представлены в диссертации. По полученным в результате усвоения различных наборов наблюдений приземным эмиссиям CO<sub>2</sub> рассчитывались две характеристики для наблюдений: среднеквадратичное отклонение (*std*) и  $\chi^2$ .

Данные характеристики рассчитывались сначала по априорным полям источников и стоков, а затем по восстановленным после усвоения наблюдений. Результаты расчетов приведены в таблице 1.

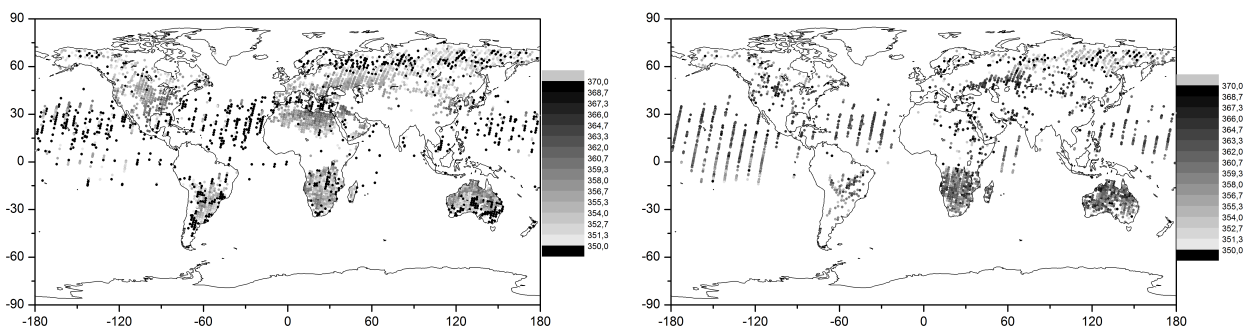


Рис. 6. Распределение  $XCO_2$  (в ppm) для спутника GOSAT для июня месяца 2009 года. Справа данные, полученные по PPDF методу, слева данные, полученные по стандартному методу L2v02.xx

Таблица 1

Сводная таблица результатов расчетов для различных наборов наблюдений

	<i>surf</i>		<i>PPDF</i>		<i>L2v02.xx</i>		<i>surf+PPDF</i>		<i>surf+L2v02.xx</i>	
	до	после	до	после	до	после	до	после	до	после
<i>std, ppm</i>	2.37	2.21	2.87	2.53	2.50	2.17	2.85	2.63	2.50	2.13
$\chi^2$	7.37	4.09	1.32	1.02	1.00	0.76	1.62	1.32	1.22	0.85
<i>Кол-во набл-ий, штук</i>	2580		49949		71924		52509		74542	
<i>сист. ошибка, ppm</i>			-0.22		-1.17		-0.32		-0.80	

По данным глобальной стационарной сети наблюдений GLOBALVIEW-2010 можно сделать вывод, что за 2009-2010 год концентрация  $CO_2$  увеличилась на 2.3 ppm. Оценки показывают, что такое увеличение концентрации можно ожидать в случае если общий глобальный среднегодовой поверхностный поток  $CO_2$  будет около 4.5 ГтС/год. Соответствующие расчеты были проведены для всех пяти наборов наблюдений. Результаты представлены на рис. 7. Из рисунка можно увидеть, что лучше всего со значением 4.5 ГтС/год согласуются потоки, полученные с использованием только стационарных

наблюдений, а также с использованием только спутниковых наблюдений RPDF и комбинация стационарных наблюдений и спутниковых наблюдений RPDF. Что же касается результатов с добавлением спутниковых наблюдений L2v02.xx, то они не сильно отличаются от априорных значений и довольно далеки от ожидаемых 4.5 ГтС/год. Таким образом можно сделать вывод, что потоки, полученные с использованием спутниковых наблюдений по алгоритму L2v02.xx в глобальном масштабе не сходятся с действительностью.

Для оценки качества решения обратной задачи и восстановленных источников и стоков CO<sub>2</sub> было проведено сравнение с независимыми данными мачтовых наблюдений. Для этого использовалась сеть Русско-Японских наземных станций, расположенных в тайге, степи и болотистых областях Сибири. В частности было выбрано 8 станций (таблица 2).

По полученным в результате усвоения данных наблюдений эмиссиям CO<sub>2</sub> при помощи прямой совмещенной эйлеровой-лагранжевой модели рассчитывались концентрации в точках расположения станций, после чего результаты сравнивались с измеренными значениями. В качестве характеристик сравнения были выбраны следующие (рис. 8):  $\chi^2$ , средняя ошибка между наблюдаемыми и модельными значениями и среднеквадратичное отклонение между наблюдаемыми и модельными значениями. Как и ожидалось, отличие между результатами, полученными по априорным потокам, и результатами, полученными после усвоения только стационарных наблюдений практически нет. Это связано с тем, что над территорией России нет станций из сети колбовых наблюдений NOAA, следовательно ждать сильного улучшения потоков в этом регионе не приходится. Что же касается результатов со спутниковыми данными, то можно сделать вывод, что при использовании наблюдений, полученных при помощи RPDF метода, наблюдается уменьшение значения  $\chi^2$  и соответствующих ошибок по сравнению с априорными потоками. При использовании наблюдений, полученных при помощи алгоритма L2v02.xx наоборот наблюдается ухудшение в соответствующих характеристиках.

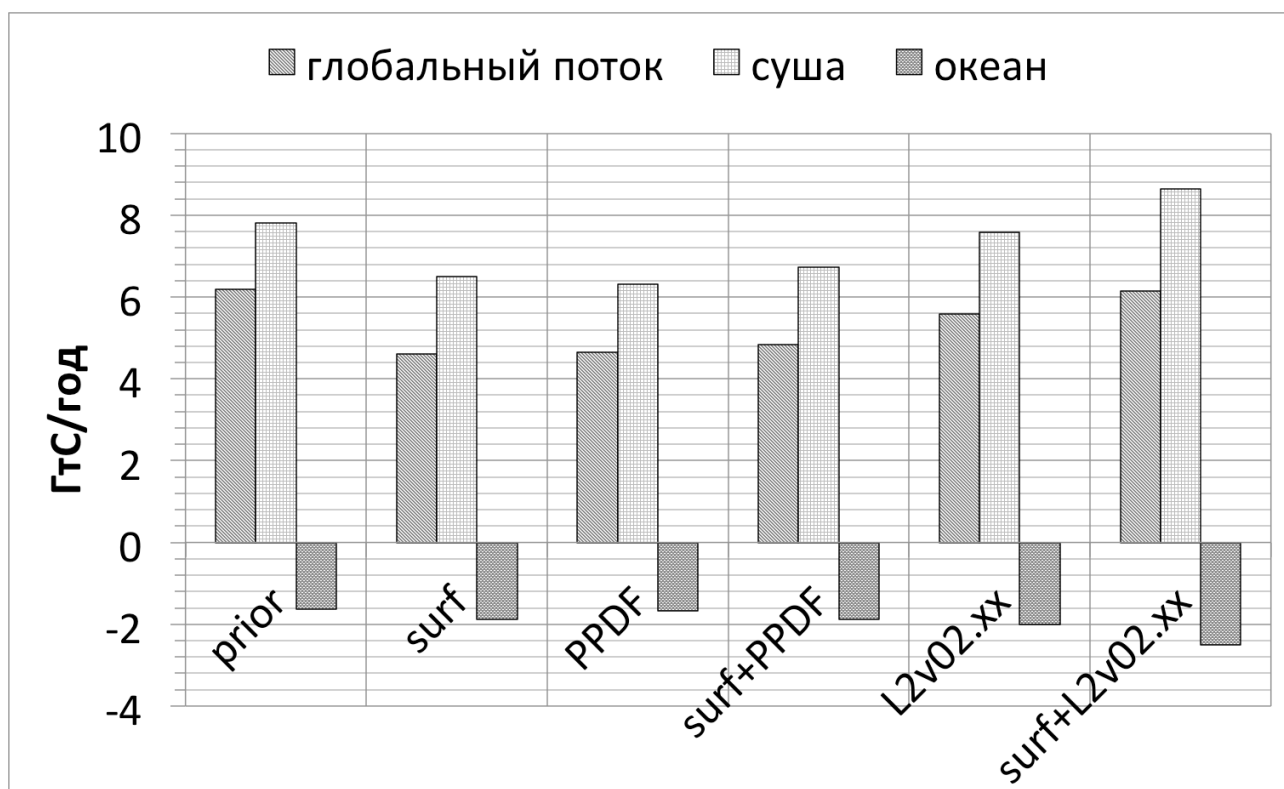


Рис. 7. Среднегодовые глобальный общий поток, поток от суши и поток от океана

Таблица 2

Расположение станций наблюдений в Сибири

Название станции	Долгота, градусы	Широта, градусы	Высота, м
Воганово	62.32	54.50	200
Саввушка	82.13	51.33	400
Игрим	64.42	63.19	25
Ноябрьск	75.78	63.43	100
Демьянское	70.87	59.79	75
Березоречка	84.33	56.15	150
Якутск	129.36	62.09	130
Карасевое	82.42	58.25	50

Для территории России за период времени с июня 2009 по май 2010 был рассчитан среднегодовой поток  $\text{CO}_2$ . Результаты представлены на рис. 9. Видно, что результаты отличаются довольно сильно в зависимости от набора используемых в усвоении наблюдений, но опираясь на результаты представленные на рис. 8 можно сделать вывод, что наиболее верная оценка получена при помощи комбинации *surf+PPDF*. В таком случае среднегодовой поток от территории России равен  $-0.63$  ГтС/год. Отметим, что априорная оценка общей среднегодовой эмиссии  $\text{CO}_2$  с территории России составляет  $+0.2$  ГтС/год.

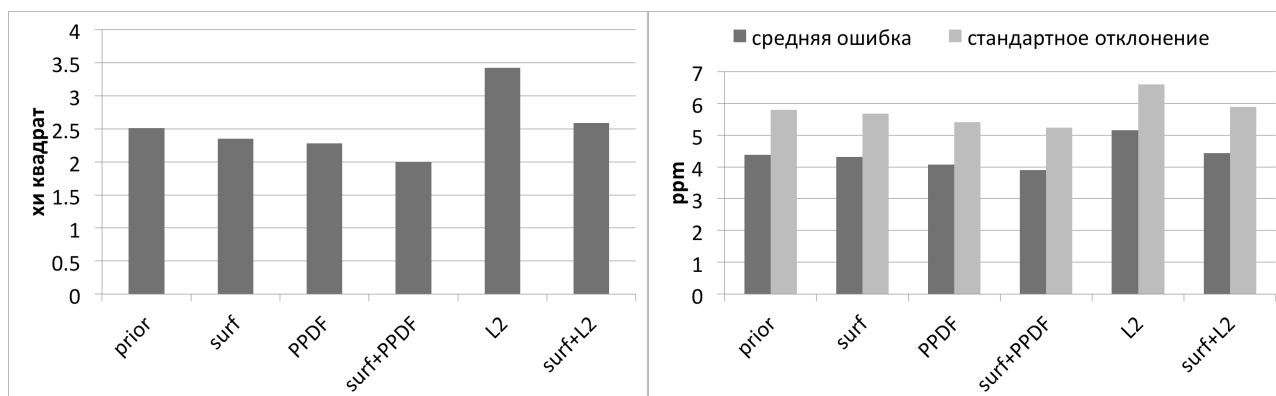


Рис. 8. Результаты расчетов для станций наблюдений, расположенных в Сибири.  $\chi^2$  (слева). Средняя ошибка и стандартное отклонение (справа)

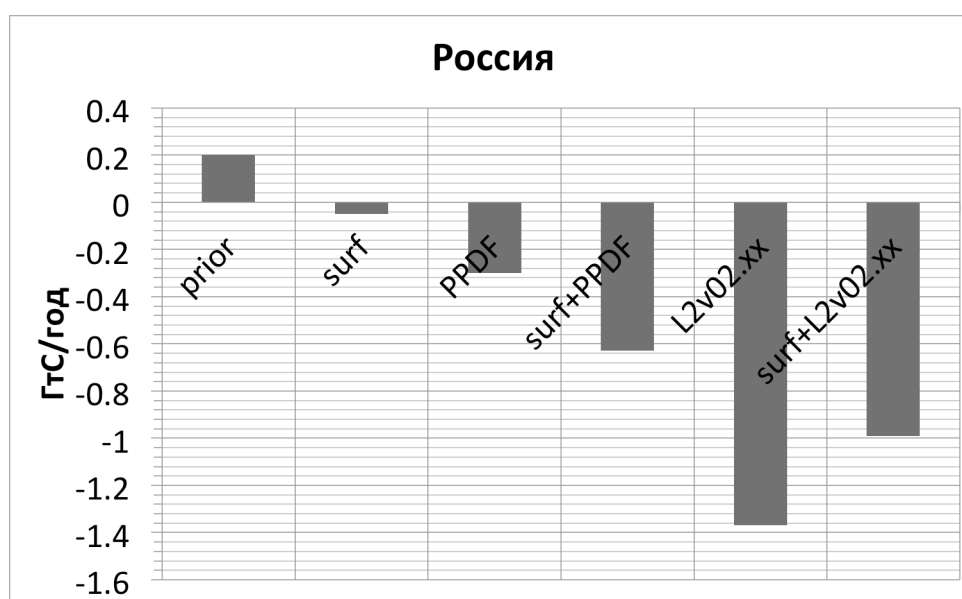


Рис. 9. Среднегодовой поток от территории России



## **Основные результаты и выводы.**

В работе получены следующие научно-практические результаты:

- Построена универсальная численная схема переноса атмосферных компонент, основанная на принципе сохранения моментов второго порядка, для эйлеровых моделей. Данная схема имеет четвертый порядок точности по пространству, а также способна производить расчеты на нерегулярных сетках.

- Разработан новый метод восстановления приземных источников и стоков CO<sub>2</sub> по данным глобальных наблюдений, основанный на разложении соответствующих видов эмиссий по ограниченному набору эмпирических ортогональных функций.

- Валидация разработанного подхода показала, что использование эмпирических ортогональных функций позволяет адекватно описывать пространственно-временную изменчивость приземных источников и стоков CO<sub>2</sub>.

- Разработан алгоритм решения задачи усвоения наблюдений при помощи совмещенной эйлеровой-лагранжевой модели (GELCA).

- Разработана система последовательного усвоения данных наблюдений за концентрациями CO<sub>2</sub>.

- Получены карты приземных источников и стоков CO<sub>2</sub> с разрешением 1x1 градус для 2009-2010 гг.

- Проведенные в процессе работы исследования позволяют сделать вывод, что разработанный подход для восстановления приземных источников/стоков CO<sub>2</sub> и разработанная система усвоения данных могут быть применены при решении подобных задач для других атмосферных компонент.

**Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:**

1. Belikov D., Maksyutov S., Miyasaka T., Saeki T., Zhuravlev R., Kiryushov B. Mass-conserving tracer transport modelling on a reduced latitude-longitude grid with NIES-TM // Geosci. Model Dev. 2011. V. 4. P. 207-222

2. Zhuravlev R., Khattatov B., Kiryushov B., and Maksyutov S., Technical Note: A novel approach to estimation of time-variable surface sources and sinks of

carbon dioxide using empirical orthogonal functions and the Kalman filter // Atmos. Chem. Phys. 2011. V. 20. P. 10305-10315

3. Ganshin A., Oda T., Saito M., Maksyutov S., Valsala V., Andres R. J., Fisher R.E., Lowry D., Lukyanov A., Matsueda H., Nisbet E. G., Rigby M., Sawa Y., Toumi R., Tsuboi K., Varlagin A., Zhuravlev R. A global coupled Eulerian-Lagrangian model and  $1 \times 1$  km CO<sub>2</sub> surface flux dataset for high-resolution atmospheric CO<sub>2</sub> transport simulations // Geosci. Model Dev. Discuss. 2011. V. 4. P. 2047-2080.

4. Oda, T., Ganshin, A., Saito, M., Andres, R. J., Zhuravlev, R., Sawa, Y., Fisher, R. E., Rigby, M., Lowry, D., Tsuboi, K., Matsueda, H., Nisbet, E. G., Toumi, R., Lukyanov, A., and Maksyutov, S.: An improved atmospheric CO<sub>2</sub> simulation using an Eulerian-Lagrangian coupled model and a high-resolution emission dataset, submitted to "Lagrangian Modeling of the Atmosphere", AGU Geophysical monograph series, 2012

5. Журавлев Р.В., Ганьшин А.В., Максютлов Ш.Ш., Ощепков С.Л., Хаттатов Б.В.: Оценка глобальных потоков CO<sub>2</sub> для 2009-2010 года с использованием данных наземных и спутниковых (GOSAT) наблюдений при помощи ЭОФ // Оптика атмосфер. и океана. 2012 (в печати).

6. Ганьшин А.В., Журавлев Р.В., Максютлов Ш.Ш., Лукьянов А.Н., Мукай Х.: Моделирование вклада континентальных антропогенных источников в изменчивость концентраций CO<sub>2</sub> в зимний период на острове Хатерума // Оптика атмосфер. и океана. 2012 (в печати).

7. A. Ganshin, S. Maksyutov, T. Oda, M. Saito, V. Valsala, Y. Koyama, A. Ito, R. J. Andres, R. Zhuravlev, A. Lukyanov (2010), Global high resolution atmospheric CO<sub>2</sub> simulation with 1x1 km surface fluxes and coupled (Eulerian/Lagrangian) model, Abstract A41J-04 presented at 2010 Fall Meeting, AGU, San Francisco, Calif., 13-17 Dec.

8. Ganshin , T. Oda , M. Saito, Y. Koyama, V. Valsala, R. J. Andres, R. Zhuravlev, A. Lukyanov, S. Maksyutov, A. Ito, H. Mukai, "Simulation of CO<sub>2</sub> concentrations using coupled (Eulerian/Lagrangian) model with global high resolution (1km x 1km) surface fluxes", European Geosciences Union General Assembly 2010, Vienna, Austria, 02-07 May 2010.