

Российская академия наук
Уральское отделение
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт промышленной экологии

На правах рукописи

Дубинкина Екатерина Сергеевна

**Моделирование аэрозольных полей на основе совместного анализа
данных солнечной фотометрии и информации о динамике
атмосферы**

Специальность 25.00.29 – Физика атмосферы и гидросферы

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:
кандидат физико-математических наук,
Поддубный Василий Алексеевич

Екатеринбург – 2015

Содержание

Введение	4
Глава 1 Обратные траектории движения воздуха в задачах интерпретации результатов мониторинга атмосферных примесей.....	12
1.1 Обратные траектории движения воздуха	12
1.2 Обзор методов, использующих совместный анализ результатов измерений и информации о динамике атмосферы.....	15
1.3 Оценки потоков атмосферного аэрозоля в разных географических регионах России.....	17
1.4 Зависимость оптических характеристик атмосферы от типов ландшафтов, над которыми проходили воздушные потоки	24
1.4.1 Исходные данные и инструменты	25
1.4.2 Методика проведения анализа и полученные результаты.....	27
Основные результаты главы 1	32
Глава 2 Метод флюид-локации атмосферы.....	34
2.1 Методы статистики обратных траекторий	34
2.2 Общее описание метода флюид-локации атмосферы	38
2.3 Особенности численной реализации метода.....	45
2.4 Исходные данные для моделирования средних полей концентраций аэрозоля	51
2.5 Результаты расчета среднего поля объемной концентрации тонкодисперсного аэрозоля на территории России.....	55
Основные результаты главы 2	59
Глава 3 Верификация метода ФЛА	61
3.1 Общая постановка задачи верификации метода ФЛА	61
3.2 Расчет погрешностей статистической оценки поля средних концентраций .	64
3.2.1 Задача оценки медиан концентраций.....	66
3.2.2 Задача оценки средних концентраций	67
3.2.3 Задача определения зон влияния, моделирования, контроля.....	68
3.2.4 Результаты определения погрешностей статистических оценок средних полей концентраций.....	70
3.3 Способы верификации метода ФЛА	73

3.3.1 Сравнение результатов моделирования с измерениями в контрольных точках мониторинга	73
3.3.2 Сравнение пространственных распределений полей в контрольных зонах	75
3.3.3 Сопоставление рассчитанного эффективного поля концентрации с расположением известных источников загрязнения.....	78
3.3.4 Верификация метода ФЛА на основе данных спутниковых измерений	79
Основные результаты главы 3.....	81
Глава 4 Восстановление трехмерных средних полей концентраций аэрозоля методом ФЛА	83
4.1 Сухое осаждение частиц на подстилающую поверхность	83
4.1.1 Модель сухого осаждения Занга	85
4.1.2 Результаты моделирования скоростей сухого осаждения частиц	94
4.2 Расчет трехмерных траекторий движения воздушных потоков	98
4.3 Вертикальный профиль распределения аэрозоля.....	99
4.4 Глобальная цифровая модель рельефа GTOPO30	101
4.5 Трехмерное среднее поле распределения концентрации тонкодисперсного аэрозоля.....	104
4.5.1 Результаты моделирования по данным фотометрических измерений на Среднем Урале.....	104
4.5.2 Результаты моделирования по данным фотометрических измерений в Западной Сибири.....	108
Основные результаты главы 4.....	112
Заключение.....	113
Литература.....	116
Приложение А	128
Приложение Б	130

Введение

Стремительное развитие промышленности в XX и XXI вв. нанесло значительный ущерб окружающей среде. В настоящее время чрезвычайно актуальной является проблема загрязнения атмосферного воздуха – состав атмосферы оказывает непосредственное влияние на здоровье людей, а его изменчивость является ключевым аспектом, определяющим глобальные климатические процессы Земли.

Измерения, численное моделирование и анализ полей концентраций содержащихся в атмосфере компонентов – важные этапы в решении самых разнообразных задач физики атмосферы. Для оценки пространственной структуры атмосферных примесей наибольшее распространение получили методы, в основе которых лежат численные модели гидротермодинамики атмосферы и уравнения переноса [1, 2]. В качестве исходной информации в классической постановке задач для расчета полей примесей используются данные об инвентаризации выбросов загрязняющих компонентов в атмосферу и поля метеорологических величин (давление, температура, скорость ветра и т. д.). В некоторых случаях поля метеорологических параметров находятся одновременно с решением задач переноса.

Другой подход к построению полей загрязнения атмосферы основывается на использовании результатов измерений в большом количестве точек мониторинга, распределенных в пространстве, с привлечением интерполяционных методов и/или результатов моделирования. Данный подход может быть использован для моделирования полей загрязнения локального масштаба в ходе проведения специально поставленного эксперимента, где в качестве информации о загрязнении атмосферы могут служить, например, результаты снеговой съемки [3, 4], пассивного пробоотбора [5, 6] и т. д. Кроме того, с помощью таких методов возможно построение пространственного распределения примесей регионального масштаба, но только в областях с густой сетью стационарных измерительных станций [7].

В работе [8] приводятся и анализируются пространственные распределения аэрозольной оптической толщи для шести длин волн, а также распределения счетной и массовой концентрации аэрозоля, построенные методом картографирования на основе данных измерений 37 станций озонметрической сети на территории СССР.

Пространственная структура атмосферных примесей может быть также исследована с привлечением инструментов дистанционного зондирования. Сканирующие лидары позволяют восстанавливать поля коэффициента обратного рассеяния частиц аэрозоля, характеризующиеся высоким пространственным разрешением (3 м), но только локального масштаба (от 500 м до нескольких километров, в зависимости от погодных условий) [9, 10]. Для анализа пространственного распределения аэрозоля регионального и глобального масштабов широко применяются методы спутникового дистанционного зондирования Земли из космоса [11, 12].

Принципиально другой подход к оценке полей концентраций примесей используется в методах статистики обратных траекторий (COT), в основе которых лежит совместный анализ результатов измерений в одном или нескольких пунктах мониторинга и информации о динамике атмосферы [13–15]. В настоящей работе описан метод флюид-локации атмосферы (ФЛА), который является модификацией методов COT. В отличие от классических методов COT метод ФЛА основан на решении уравнения сохранения вещества в представлениях Эйлера и Лагранжа, что позволяет развить методику в направлении учета реальных физико-химических процессов, которым подвержена примесь в атмосфере.

В данной работе анализировалось содержание аэрозоля в атмосфере. Атмосферный аэрозоль обладает высокой временной и пространственной изменчивостью, при этом является одним из ключевых компонентов в атмосфере, оказывающих большое влияние на радиационный баланс Земли. Кроме того, разнообразие источников поступления аэрозоля в атмосферу, а также влияние некоторых аэрозолей на здоровье людей, делают исследование пространственных

полей аэрозольного загрязнения сложной, но тем не менее важной задачей.

Наиболее известной научно-прикладной системой глобального аэрозольного мониторинга является система AERONET (AErosol RObotic NETwork, <http://aeronet.gsfc.nasa.gov>), в рамках которой проводятся спектральные фотометрические измерения оптических характеристик атмосферы по всему земному шару. Однако построение и анализ пространственных полей аэрозольного загрязнения атмосферы исключительно по данным наблюдений (без использования моделирования) возможно в регионах с достаточно густой сетью станций мониторинга (например, в Европе и США). Для российского сегмента сети мониторинга AERONET расстояния между станциями измеряются тысячами километров, поэтому восстановление пространственной структуры полей аэрозоля требует привлечения специальных методов, например, метода ФЛА, развитию которого посвящена данная работа.

Цель диссертационной работы состоит в разработке метода восстановления полей концентраций примесей в атмосфере, основанного на совместном анализе результатов приборных измерений концентраций загрязняющих веществ и данных о динамике атмосферы.

Для достижения поставленной цели решаются следующие **основные задачи**:

1. Выполнить количественные оценки плотностей потоков объемных концентраций аэрозоля в различных географических регионах России на основе данных фотометрических измерений.
2. Разработать методику анализа результатов наземных фотометрических измерений АОТ, учитывающую динамические процессы в атмосфере – траектории движения воздушных потоков до их прихода в пункт мониторинга.
3. Восстановить квазидвумерные средние поля концентраций тонкодисперсного аэрозоля в атмосфере северной части евразийского континента, используя метод флюид-локации атмосферы (ФЛА).
4. Разработать методику расчета погрешностей статистической оценки средних полей концентраций, восстановленных методом ФЛА.

5. Разработать способы верификации метода ФЛА, включая сопоставление результатов моделирования аэрозольных характеристик атмосферы с данными независимых наземных и спутниковых измерений.

6. Переработать метод ФЛА для учета физических процессов сухого осаждения аэрозольных частиц на подстилающую поверхность и учета профилей вертикальных распределений аэрозоля в атмосфере.

7. Решить задачу восстановления трехмерных средних полей концентраций аэрозоля по данным наземных измерений.

Исследование носит теоретический характер, в качестве **основных методов** использовались: статистический анализ пространственно распределенных величин; методы численного решения уравнения переноса примеси с использованием конечно-разностных схем; методы статистики обратных траекторий.

Научная новизна диссертационной работы:

- Предложена методика, позволяющая проводить совместный анализ результатов измерений аэрозольной оптической толщи (АОТ) атмосферы и обратных траекторий движения воздушных потоков. С помощью этой методики и с использованием инструментария геоинформационных технологий на примере анализа результатов спектральных фотометрических измерений на Среднем Урале впервые установлено статистически значимое влияние различных типов ландшафтов, над которыми проходили воздушные потоки, на АОТ атмосферы.

- Впервые с использованием метода ФЛА на основе данных фотометрических измерений на шести российских станциях мониторинга сети AERONET восстановлено квазидвумерное среднее поле тонкодисперсного аэрозоля.

- Предложена оригинальная методика и разработан алгоритм расчета погрешностей статистической оценки среднего поля концентраций, применимый для различных методов СОТ, включая метод ФЛА. Показана возможность восстановления среднего поля концентраций аэрозоля на большом удалении от пункта мониторинга – характерный размер зоны моделирования порядка 1000 км.

- Впервые выполнена верификация метода ФЛА посредством: 1) сравнения результатов моделирования с данными независимых наземных измерений; 2) сравнения полей концентраций, восстановленных по данным различных независимых пунктов мониторинга; 3) качественного сопоставления расчетного поля концентраций примеси с информацией об известных источниках загрязнения; 4) сравнения результатов моделирования с данными спутникового дистанционного зондирования. По результатам верификации показано, что метод ФЛА может использоваться для восстановления полей концентраций примеси на основе данных наземных измерений.

- Разработана физико-математическая модификация метода ФЛА, учитывающая вертикальный перенос аэрозольных частиц к поверхности за счет процессов сухого осаждения, включая гравитационное осаждение, приземную турбулентную диффузию, броуновскую диффузию в ламинарном подслое и захват частиц поверхностью. Впервые методом ФЛА, с учетом процессов вертикального переноса примеси, на примере регионов Среднего Урала и Западной Сибири построены трехмерные средние поля концентрации аэрозоля на основе данных фотометрических измерений.

На защиту выносятся следующие положения:

- Аэрозольные оптические характеристики атмосферы статистически значимо зависят от того, над территориями с какими типами ландшафтов проходили траектории движения воздушных потоков до прихода в пункт измерения. В пункте аэрозольного мониторинга на Среднем Урале медианные значения АОТ для воздушных потоков, которые проходили над засушливыми почвами или обрабатываемыми территориями, равны 0.17 и 0.18 соответственно. Эти значения статистически значимо выше медиан АОТ, при которых воздушные потоки не проходили над данными типами ландшафтов.

- Метод ФЛА позволяет без привлечения данных инвентаризации источников выбросов аэрозоля в атмосферу получать оценки пространственных квазидвумерных и трехмерных средних полей концентраций атмосферного аэрозоля регионального и глобального масштабов, используя в качестве исходных

данных результаты приборных измерений в одной или нескольких точках мониторинга и информацию о движении воздушных потоков.

- Методика, предложенная в диссертационной работе, позволяет выполнять оценки погрешностей статистического усреднения концентраций в методах СОТ, в предположении справедливости логнормального распределения измеренных концентраций примеси.

- Метод ФЛА позволяет учитывать физико-химические процессы, происходящие с примесью в атмосфере, благодаря использованию решений уравнения сохранения вещества в представлениях Эйлера и Лагранжа.

Достоверность полученных результатов обеспечивается использованием в качестве исходных данных достоверных, верифицированных, надежных результатов измерений оптических характеристик атмосферы, полученных с помощью единой приборной базы – фотометров CE-318 сети AERONET, проходящих регулярную калибровку в GSFC NASA (США). Единая для всех пунктов мониторинга система обработки данных фотометрических измерений (в том числе восстановление функций распределения аэрозольных частиц по размерам) позволяет проводить исследования аэрозольных полей регионального и глобального масштабов.

Надежность информации о динамике атмосферы обеспечивается использованием в качестве исходных данных общеизвестных метеорологических баз данных реанализа (ECMWF, NCEP/NCAR NOAA), а использованные в работе методы расчета траекторий движения воздушных частиц верифицированы путем сравнения с другими теоретическими моделями, а также с результатами масштабных натурных экспериментов.

Достоверность результатов моделирования методом ФЛА обеспечивается систематическим сравнением расчетных параметров с данными независимых приборных измерений как наземных, так и спутниковых.

Практическая значимость работы

Разрабатываемый метод ФЛА позволяет восстанавливать двумерные и трехмерные средние поля аэрозольного наполнения атмосферы, которые могут

найти применение в качестве входных данных для климатологических моделей и для решения различных экологических задач.

Апробация работы

Результаты работы были представлены на двенадцати российских и международных конференциях: XVI Международном симпозиуме «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы» (2009, г. Томск); III конференции молодых ученых «Геоинформационные технологии и космический мониторинг» (2010, г. Ростов-на-Дону); XVII–XXI Совещаниях рабочей группы «Аэрозоли Сибири» (2010–2014, г. Томск); VIII Всероссийской конференции по анализу объектов окружающей среды «Экоаналитика-2011» (2011, г. Архангельск); Международном симпозиуме «Атмосферная радиация и динамика» (МСАРД-2011) (2011, г. С.-Петербург); XXXIX, XXXX конференциях «Математическое моделирование в проблемах рационального природопользования» (2011–2012, г. Ростов-на-Дону); XVI Международной школе-конференции молодых ученых «Состав атмосферы. Атмосферное электричество. Климатические эффекты» (2012, г. Москва); XVIII Международном симпозиуме «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы» (2012, г. Иркутск).

Личный вклад автора

Постановка задач осуществлялась совместно с научным руководителем. Автор принимал непосредственное участие в разработке численного алгоритма и развитии метода ФЛА, в проведении расчетов квазидвумерных и трехмерных средних полей объемных концентраций тонкодисперсного аэрозоля, анализе результатов моделирования и формулировке выводов. Самостоятельно автором были разработаны способы верификации метода ФЛА; предложена методика определения погрешностей статистической оценки средних концентраций в различных ячейках расчетной области; осуществлена разработка алгоритма метода ФЛА, учитывающего процессы сухого осаждения аэрозольных частиц на подстилающую поверхность и распределение аэрозольных частиц по высоте.

Публикации

По материалам исследования опубликованы 28 работ, в том числе глава в

коллективной монографии и четыре статьи в журналах из списка, рекомендованного ВАК.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и двух приложений. Общий объем работы составляет 131 страницу, включая 11 таблиц и 29 рисунков. Список литературы включает 123 источника.

Глава 1 Обратные траектории движения воздуха в задачах интерпретации результатов мониторинга атмосферных примесей

В настоящее время для интерпретации результатов мониторинга и при решении задач в самых разных областях физики атмосферы широко применяется визуальный анализ траекторий движения воздушных частиц. Очень часто результаты измерений содержания в атмосфере как газовых, так и аэрозольных примесей сопоставляются с траекториями движения воздуха для выяснения происхождения, возможных источников и объяснения тех или иных характеристик загрязняющих веществ в разные периоды времени.

1.1 Обратные траектории движения воздуха

Пространственный и временной анализ траекторий движения воздушных потоков получил широкое распространение благодаря появлению доступного интернет-сервиса для проведения расчетов с помощью модели HYSPLIT (<http://ready.arl.noaa.gov/>), а также открытого свободно распространяемого программного обеспечения FLEXTRA [16] (<http://transport.nilu.no/flexpart>), предназначенных для моделирования траекторий движения воздушных частиц в атмосфере.

Проведение расчетов как прямых, так и обратных траекторий движения воздушных частиц возможно только при условии свободного доступа к необходимой метеорологической информации, что обеспечивают в настоящее время открытые базы данных реанализа, например, Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (ECWMF, <http://www.ecmwf.int/>) и Национального управления океанических и атмосферных исследований США (NOAA/OAR/ESRLPSDUSA, <http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/reanalysis/>). Другим источником необходимой метеорологической информации могут служить результаты численного моделирования динамики атмосферы с учетом ассимиляции данных метеорологических измерений, полученных с помощью таких программных комплексов, как WRF (<http://www.wrfmodel.org/index.php>) или

MM5 (<http://www.mmm.ucar.edu/mm5/mm5-home.html>).

Кроме упомянутых выше программных комплексов для расчета обратных траекторий, получивших широкое распространение благодаря своей доступности и гибкости, существуют другие источники, которые представляют собой уже сформированные базы данных, содержащие информацию о динамике атмосферы. На сайте системы аэрозольного мониторинга AERONET (AErosol RObotic NETwork, <http://aeronet.gsfc.nasa.gov>), в рамках которой проводятся спектральные фотометрические измерения оптических характеристик атмосферы по всему земному шару (рис. 1.1), для каждой станции сети доступны обратные траектории движения воздушных потоков.



Рис. 1.1. Схема размещения станций мониторинга глобальной сети AERONET по состоянию на 2014 г. (<http://aeronet.gsfc.nasa.gov>)

Траектория движения воздушного потока представляет собой набор точек в пространстве, каждая из которых определяется координатами положения лагранжевой частицы в определенный момент времени. По способу отсчета времени вдоль траектории различают прямые и обратные траектории движения воздуха. Прямая траектория показывает путь, который проходит воздушная частица по мере ее отдаления от точки «старта» траектории. При определении обратной траектории используется отрицательный шаг по времени, т. е. траектория характеризует путь, который прошла воздушная частица до ее

прихода в пункт мониторинга. Для станций мониторинга AERONET доступны обратные траектории, рассчитанные для изобарических поверхностей, соответствующих 950, 850, 700, 500, 400, 300, 250 и 200 гПа, которые принадлежат интервалу высот приблизительно от 0.5 до 12 км над уровнем моря. За сутки восстанавливаются две обратные траектории, соответствующие приходу воздушных масс в 0 и в 12 часов по Гринвичу.

На рис. 1.2 показан пример обратной траектории, которая стартует в 12:00 по Гринвичу (17:00 по местному времени) 13 июня 2010 г. на высоте, соответствующей давлению 950 гПа. Показанная на рис. 1.2 траектория характеризует путь воздушного потока на протяжении семи суток в точку расположения станции мониторинга сети AERONET на Среднем Урале (обозначена звездочкой).



Рис. 1.2. Пример обратной траектории движения воздушного потока для точки мониторинга сети AERONET на Среднем Урале (13.06.2010, 12:00 UTC, 950 гПа)

Надежность информации о динамике атмосферы подтверждается множеством работ, посвященных оценкам точности модельных расчетов прямых и обратных траекторий движения воздушных частиц. Такие оценки выполняются на основе сравнения результатов моделирования с реальными траекториями,

полученными в результате отслеживания передвижения специальных зондов [17,18] или же маркеров. В качестве маркеров могут выступать различные примеси, выпущенные в ходе поставленного эксперимента (инертные газы [19, 20]) или попадающие в атмосферу в результате явлений природного (пыльца [21], вулканический пепел [22, 23]) и техногенного характера (радиоактивные вещества [24]), а также физические величины (потенциальная температура, удельная влажность, потенциальный вихрь), имеющие свойство сохраняться вдоль траекторий движения воздуха [25].

Способы расчета траекторий движения лагранжевых частиц, источники ошибок, возникающих при расчетах, а также некоторые примеры использования представлены в обзоре [26].

1.2 Обзор методов, использующих совместный анализ результатов измерений и информации о динамике атмосферы

Даже без привлечения сложных математических методов моделирования, обратные траектории оказываются полезными при объяснении единичных экстремальных результатов измерений какой-либо характеристики атмосферы, позволяя проводить визуальное сопоставление с вероятными источниками.

В работе [27] с помощью совместного анализа измерений общего содержания NO_2 , проводимых в Жиганске и в Томске, а также обратных траекторий движения воздушных потоков объясняются отрицательные аномалии содержания озона в атмосфере в зимне-весенний период 2011 г., вызванные переносом стратосферного воздуха из области арктической «озоновой дыры».

Обратные траектории используются при объяснении появления искусственных радионуклидов (^{131}I , ^{134}Cs , ^{137}Cs) в районе Владивостока в период с 11 марта по 17 июня 2011 г. [28] Авторы делают вывод о том, что упомянутые радионуклиды адсорбировались на субмикронном аэрозоле в момент взрыва на АЭС Фукусима-1 и, так как в весенний период в этих областях преобладает западный перенос воздушных потоков, были перенесены от Японии в Тихий океан. Затем радиоактивные частицы достигли территории Северной Америки, а

позже пересекли Атлантический океан и Европу. В пункт мониторинга (Владивосток) радиоактивное облако пришло из Европы, пройдя через Сибирь и северо-восточную часть КНР.

В работе [29] траекторный анализ позволил связать повышенные уровни стратосферного аэрозоля, наблюдавшиеся на станциях мониторинга в Минске, Томске и Владивостоке во второй половине 2011 г., с переносом продуктов извержения вулкана Гримсвотн (Исландия).

Работы [30, 31] посвящены исследованиям структуры и динамики планетарного пограничного слоя. Благодаря анализу обратных траекторий удалось установить, что в летний период морской аэрозоль является доминирующим в планетарном пограничном слое Владивостока, в то время как в зимний период атмосфера на уровне пограничного слоя и свободной тропосферы находится под влиянием воздушных масс, пришедших из Центральной Сибири.

Более сложные подходы подразумевают анализ большого числа обратных траекторий движения воздушных потоков за длительный период времени с привлечением статистических методов, например, статистического метода кластеризации траекторий. Кластерный анализ основан на разделении всего массива траекторий на группы, объединяющие близкие между собой траектории, и последующем определении средней траектории для каждого такого кластера. Целью подобного анализа может выступать как обобщение и количественное выражение характеристик воздушных потоков, поступающих в конкретный регион [32], так и идентификация основных источников и пути поступления атмосферных примесей в рассматриваемый регион в различные сезоны [33-35].

В работе [36] представлена методика расчета поля потенциальных источников загрязнения воздуха для района Ненецкого заповедника. В качестве исходной информации использовались результаты расчетов пятисуточных обратных траекторий движения воздуха и данные о выбросах в атмосферу тяжелых металлов и сажи источниками на территории России.

Методы статистики обратных траекторий (COT) позволяют полнее использовать информацию о динамике атмосферы. Они используются для оценки

пространственной структуры полей измеряемой величины по данным локальных приборных измерений, выполненных в одной или нескольких фиксированных точках за большой период времени (см. § 2.1).

Огромное количество работ посвящено оценкам полей концентраций атмосферных примесей по всему земному шару с помощью различных вариантов методов СОР. В качестве анализируемой величины могут выступать концентрации:

- тонкодисперсной [37–39] и грубодисперсной [40, 41] фракции аэрозоля;
- летучих органических соединений [42, 43];
- озона [44, 45];
- соединений ртути в атмосфере [46, 47] и т. д.

Несмотря на то, что обратные траектории нашли широкое применение для решения самых разнообразных задач физики атмосферы, их использование далеко не ограничивается описанными выше методами. В данной диссертационной работе приводятся альтернативные способы использования обратных траекторий движения воздушных потоков для извлечения из результатов измерений дополнительной информации, которую очень сложно или даже невозможно получить иными способами.

1.3 Оценки потоков атмосферного аэрозоля в разных географических регионах России

Один из простейших методов статистики траекторий – метод климатологии потоков (*flow climatology*) [48] – позволяет ответить на вопрос о величине потоков и преобладающих направлениях переноса аэрозоля в различных географических зонах России. Метод включает статистический анализ долговременных рядов измерений для выделенных определенным образом классов траекторий (например, для секторов прихода воздушных потоков в точку мониторинга).

Для выявления связи уровней измеренных концентраций аэрозоля с направлениями ветра анализировалась информация результатов фотометрических

измерений в тех регионах России, в которых расположены станции мониторинга глобальной сети AERONET [49]. В регионе Европейской части России размещены станции мониторинга Звенигород, Москва; на Среднем Урале – станция Екатеринбург; в Западной Сибири – станция Томск; на Дальнем Востоке – станция Уссурийск; в Якутии – станция Якутск. Следует отметить, что станции, которые условно называются «Екатеринбург», «Якутск» и «Уссурийск», на самом деле расположены не на территории городов, а удалены примерно на 50 км от них.

В качестве критерия содержания аэрозоля в атмосфере использовались полные (т. е. содержащие тонкодисперсную и грубодисперсную фракции) объемные концентрации аэрозоля – суммарный объем аэрозольных частиц в столбе воздуха единичного сечения.

Вычислялись средние дневные объемные концентрации аэрозольных частиц за период мониторинга с 2004 по 2010 г. Далее полученные значения нормировались на медианное значение средние дневных концентраций аэрозоля в столбе атмосферы, рассчитанное по данным измерений в Екатеринбурге ($0.045 \text{ мкм}^3/\text{мкм}^2$). Основные статистические характеристики результатов измерений концентраций аэрозоля в разных пунктах мониторинга, соответствующих разным географическим зонам России, представлены в табл. 1.1.

Таблица 1.1. Статистические характеристики нормированных объемных концентраций аэрозоля в столбе атмосферы по данным российских станций сети AERONET и двух пунктов сравнения за период 2004–2010 гг.

	Минимум	1 ^й квартиль	Медиана	Среднее	3 ^й квартиль	Максимум
Звенигород	0.2	0.7	1.18	1.63	2.08	8.7
Москва	0.22	0.82	1.39	1.79	2.06	24.09
Екатеринбург	0.17	0.6	1.00	1.32	1.61	12.46
Томск	0.1	0.65	0.97	1.5	1.68	36.63
Якутск	0.12	0.42	0.62	1.1	1.04	23.45
Уссурийск	0.28	0.87	1.34	1.99	2.38	16.94
Мауна Лоа	0.02	0.05	0.06	0.1	0.11	4.66
Пекин	0.23	1.53	3.07	4.26	5.67	60.93

Из табл. 1.1 видно, что по значениям медианы пункты мониторинга на территории России ранжируются (от большего к меньшему) следующим образом:

Москва, Уссурийск, Звенигород, Екатеринбург, Томск, Якутск. Для сравнения в таблице приведены данные аналогичным образом нормированных объемных концентраций аэрозоля для двух станций AERONET. Первая расположена на Мауна-Лоа в средней части Тихого океана на острове Гавайи с характерной чистой атмосферой, а вторая – в столице Китая, в Пекине, с крайне неблагоприятной экологической обстановкой.

Для оценки потоков атмосферного аэрозоля рассчитывались средние в угловом секторе плотности потока объемной концентрации аэрозоля. Так как модуль плотности потока физической величины определяется как

$$F = c \cdot |\vec{v}|, \quad (1.1)$$

где c – некоторая скалярная величина;

$|\vec{v}|$ – модуль скорости движения.

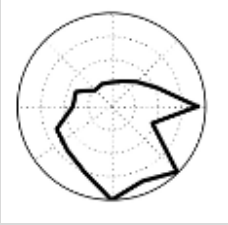
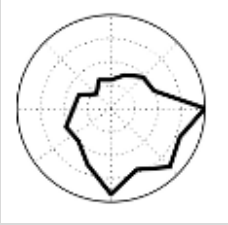
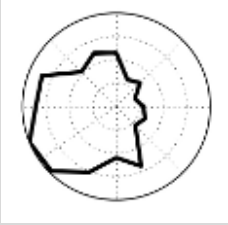
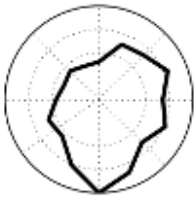
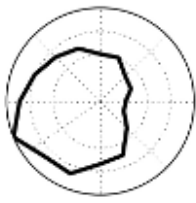
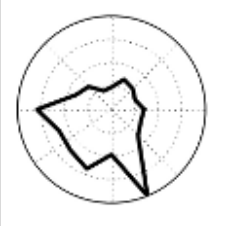
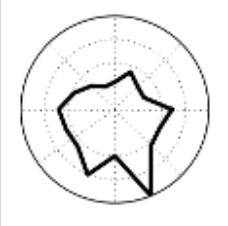
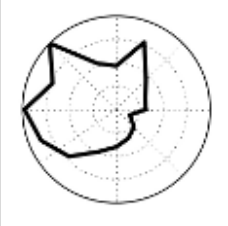
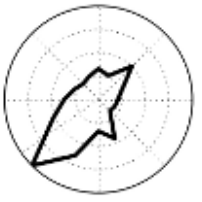
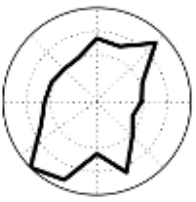
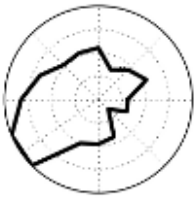
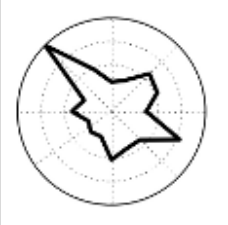
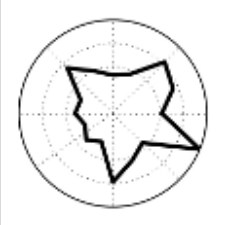
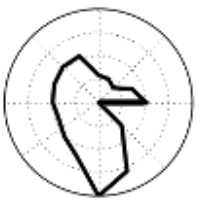
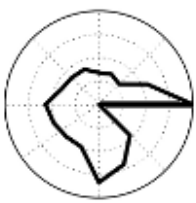
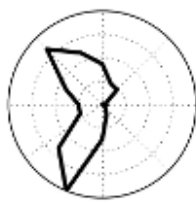
Тогда средняя плотность потока $\bar{F}$ в некотором секторе l пространства направлений равна:

$$\bar{F} = \frac{1}{N_l} \sum_{j=1}^{N_l} c_j |\vec{v}_j|, \quad (1.2)$$

где N_l – число траекторий, попавших в сектор l .

В табл. 1.2 представлены результаты расчетов угловых диаграмм следующих зависимостей для шести пунктов наблюдения российского сегмента сети мониторинга AERONET: а) нормированных средних плотностей потоков; б) средних объемных концентраций аэрозоля; в) числа траекторий от направлений прихода воздушных потоков. Всего в проведенных расчетах было использовано 16 угловых секторов по 22.5° каждый. Все данные на диаграммах нормированы на максимальные значения соответствующих признаков, поэтому диапазон их изменения составляет от 0 до 1, с шагом 0.25 в радиальном направлении. Максимальные значения для каждой величины и каждой станции мониторинга указаны на рисунке около диаграмм. Масштабом величины плотности потока является максимальное значение плотности потока аэрозоля для Екатеринбурга $0.68 ((\text{мкм}^3/\text{мкм}^2) \cdot \text{м/с})$, реализующееся с юго-восточного направления.

Таблица 1.2. Угловые диаграммы: а) нормированных плотностей потоков аэрозоля; б) объемных концентраций аэрозоля; в) направлений прихода воздушных потоков

Пункт мониторинга	Диаграммы		
	а)	б)	в)
Звенигород	 Max=0.98	 Max=3.12	 Max=42
Москва	 Max=1.50	 Max=2.94	 Max=85
Екатеринбург	 Max=1.00	 Max=2.66	 Max=45
Томск	 Max=1.44	 Max=2.28	 Max=67
Якутск	 Max=0.76	 Max=1.98	 Max=88
Уссурийск	 Max=1.80	 Max=4.20	 Max=67

Как видно из табл. 1.2, в пунктах мониторинга Москвы, Екатеринбурга, Томска направления, соответствующие максимальным потокам (колонка а) и концентрациям (колонка б) совпадают. Для Звенигорода, Уссурийска, Якутска направления максимальных плотностей потоков не совпадают с направлениями ветра, при которых были зафиксированы максимальные объемные концентрации аэрозоля.

Как известно, в средних широтах европейской части России преобладает западное направление переноса воздушных масс. Из диаграмм (в) в табл. 1.2 видно, что для пунктов мониторинга в Звенигороде и Москве преобладает юго-западное направление, а в Екатеринбурге – западное и северо-западное. В Томск воздушные потоки приходят преимущественно с юго-запада. Для Якутска резко выделяется северо-западное направление, а для Уссурийска характерен юго-западный перенос. Следует отметить, что число реализаций прихода воздушных потоков из определенного направления подсчитано только для периодов, когда выполнялись фотометрические измерения, что соответствует безоблачной или малооблачной атмосфере. Поэтому приведенная в табл. 1.2 для каждого пункта мониторинга диаграмма (в) может существенно отличаться от розы ветров соответствующих регионов.

Несмотря на преобладание западного переноса, для Звенигорода и Москвы максимумы плотности потока аэрозоля (диаграммы (а) в табл. 1.2) наблюдаются с южного направления, причем значения этих максимумов различаются: для Москвы это 1.5, а для Звенигорода – 0.98. Как показал подробный анализ результатов измерений, столь существенное различие плотностей потоков связано с тем, что в период с 08.02.2010 по 13.02.2010 в Москве наблюдались очень большие скорости ветра (до 20 м/с). Кроме того, в последний день указанного периода (т. е. 13.02.2010) эта метеорологическая ситуация совпала с аномально высокой средней дневной концентрацией аэрозоля. В Звенигороде в эти дни измерения не проводились, что привело к занижению экстремальных значений плотностей потоков для южных направлений ветра в пункте мониторинга Звенигорода по сравнению с Москвой. Если исключить из рассмотрения

описанный период, то плотности потоков концентраций аэрозоля для Москвы и Звенигорода почти совпадают (1.10 и 0.98 соответственно). В отличие от Москвы для Звенигорода выделяются еще два существенных максимума потоков аэрозоля – с востока (вероятно, сказывается соседство крупного мегаполиса) и с юго-востока.

Распределения измеренных объемных концентраций аэрозоля по направлениям прихода воздушных потоков (диаграммы (б) на табл. 1.2) в целом аналогичны распределению плотностей потоков. Однако максимальная концентрация в Звенигороде фиксируется не при южных ветрах, как это наблюдается в Москве, а при ветре с востока, со стороны Москвы. Максимальные объемные концентрации различаются незначительно: для Звенигорода – 3.12, а для Москвы – 2.94.

В регионе Западной Сибири (станция мониторинга в Томске) максимальное значение плотности потока аэрозоля наблюдается с юго-западного направления и равно 1.44, а максимальное значение концентрации равно 2.88. Следует отметить, что в отличие от потоков для диаграммы концентраций характерны еще два направления с повышенными значениями – юго-восточное и северо-восточное.

Для Якутска направление прихода воздушных потоков, при котором наблюдается максимальная (1.98) объемная концентрация аэрозоля, – юго-восточное, в то время как наибольшее значение плотности потока (0.76) соответствует северо-западному направлению. Примечательно, что в Якутске наблюдаются самые низкие среди российских станций мониторинга уровни концентрации и плотности потока аэрозоля.

Для Уссурийска, так же как и для Якутска, направления максимумов плотности потока и концентрации не совпадают, но восточный максимум (4.20) концентрации имеет малую достоверность, так как с этого направления приходило мало траекторий воздушных частиц (всего 4 траектории за весь период измерений, см. диаграмму (в) в табл. 1.2). Таким образом, можно считать, что для Уссурийска наибольшие плотность потока (1.80) и концентрация аэрозоля наблюдаются при южных направлениях воздушных потоков.

Кроме зависимости величины плотности потока аэрозоля от направления были рассчитаны суммарные средние плотности потоков аэрозоля в меридиональном и широтном направлениях, представленные в табл. 1.3. Необходимо отметить, что данные в табл. 1.3 следует рассматривать как оценочные, поскольку в расчетах использовались траектории движения воздуха только на нижней изобарической поверхности 950 гПа, не учитывалось распределение аэрозоля по высоте и использовались среднедневные объемные концентрации аэрозоля в столбе атмосферы, которые измерялись только в безоблачные или малооблачные дни.

Интересен следующий факт: хотя в Европейской части России преобладает западный перенос воздушных масс, на станциях мониторинга Москвы и Звенигорода суммарная средняя плотность потока аэрозоля в широтном направлении существенно меньше, чем в меридиональном направлении. На Среднем Урале, в Западной Сибири и на Дальнем Востоке, наоборот, величины меридиональных потоков существенно меньше, чем широтные потоки. Суммарные широтные и меридиональные потоки минимальны для станции мониторинга в Якутии. Для всех регионов, кроме Якутии, на изобарической поверхности 950 гПа преобладает суммарный вынос аэрозоля на север. Максимальное значение плотности потока аэрозоля на изобарической поверхности 950 гПа в широтном направлении, с запада на восток, наблюдается в регионе Дальнего Востока (станция мониторинга Уссурийск).

Таблица 1.3. Средние плотности потоков объемных концентраций аэрозоля в меридиональном и широтном направлениях, $((\text{мкм}^3/\text{мкм}^2) \cdot \text{м/с})$

Направление движения воздушного потока на	Звенигород	Москва	Екатеринбург	Томск	Якутск	Уссурийск
восток	0.224	0.245	0.269	0.344	0.179	0.365
запад	0.244	0.258	0.155	0.189	0.177	0.189
север	0.348	0.409	0.258	0.348	0.151	0.627
юг	0.132	0.192	0.141	0.185	0.200	0.396
суммарный с запада на восток	0.072	0.068	0.127	0.162	0.002	0.262
суммарный с юга на север	0.137	0.141	0.033	0.092	-0.051	0.089

Таким образом, использованный вариант метода климатологии потоков демонстрирует некоторые возможности совместного анализа результатов приборных измерений и информации о динамике атмосферы. С помощью этого метода получены оценки потоков атмосферного аэрозоля в шести различных географических зонах России. Анализ показал, что по данным спектрофотометрического мониторинга аэрозоля на территории России на изобарическом уровне 950 гПа преобладает вынос аэрозоля в северном направлении, а максимальные значения широтного переноса фиксируются на Дальнем Востоке (при высоких его значениях также на Урале и в Западной Сибири).

1.4 Зависимость оптических характеристик атмосферы от типов ландшафтов, над которыми проходили воздушные потоки

Традиционно для характеристики содержания аэрозоля в атмосфере при локальном наземном мониторинге или при моделировании его переноса в атмосфере используют концентрацию аэрозоля. В то же время при дистанционном зондировании (наземном или космическом) более удобным параметром, описывающим общее содержание аэрозоля, является аэрозольная оптическая толща (АОТ) атмосферы. Одним из основных факторов, определяющих значения АОТ в отсутствие лесных, торфяных пожаров и других экстремальных событий, является тип воздушных масс, приносящих в пункт мониторинга воздух с разным содержанием аэрозоля [50]. Известно, что характер воздушной массы, ее параметры (температура, влажность, содержание аэрозоля и т.д.) определяются тепло- и массообменом между атмосферой и подстилающим ландшафтом, над которым эта воздушная масса сформировалась и затем перемещалась. Следовательно, можно предположить, что оптические характеристики атмосферы, обусловленные содержанием аэрозоля, зависят от того, над какими типами ландшафтов проходили воздушные массы, поступившие в пункт мониторинга в момент проведения измерений.

В связи с этим возникают следующие вопросы [49, 51]:

1) Зависит ли измеренное значение АОТ атмосферы от типов ландшафтов, над которыми проходили воздушные потоки до прибытия в пункт наблюдения?

2) Существует ли зависимость значений АОТ от времени движения воздушного потока над тем или иным типом ландшафта?

Поскольку сформулированные задачи опираются на информацию о пространственном распределении различных типов ландшафтов и о траекториях движения воздушных частиц, то для их решения требуется привлечение инструментария геоинформационных систем (ГИС).

1.4.1 Исходные данные и инструменты

В настоящей работе в качестве основного рабочего инструмента использовалась ГИС GRASS с открытым исходным кодом (Geographic Resources Analysis Support System, <http://grass.osgeo.org>), поддерживающая ввод, обработку, анализ и отображение растровых, векторных 2D/3D данных, геопространственное моделирование и визуализацию [52]. Для хранения атрибутов векторных объектов применялась свободно распространяемая объектно-реляционная система управления базами данных PostgreSQL (<http://www.postgresql.org>).

Классификация ландшафтов, характеризующая различные типы обмена между ландшафтом и атмосферой, была создана U.S. Geological Survey (USGS) на базе особенностей почвенно-растительного покрова, полученных с помощью спутниковых измерений и аэрофотосъемки (<http://edc2.usgs.gov/glcc/>). Растровая карта, содержащая 19 категорий различных типов обмена «биосфера–атмосфера» приведена на рис. 1.3 а [53].

Для решения поставленных выше задач исходная классификация излишне подробна. Поэтому методами ГИС первоначальная карта была переклассифицирована таким образом, чтобы использовать в дальнейшем анализе только пять классов принципиально разных типов обмена «ландшафт–атмосфера» (рис. 1.3 б). Новые классы ландшафтов с указанием объединяемых исходных категорий перечислены ниже:

- 1) *вода* – внутренние воды, океан;
- 2) *лед* – льды и ледники;
- 3) *засушливые почвы* – степной ландшафт с низкими травами, пустыни, полупустыни;
- 4) *антропогенные ландшафты* – посевы, сельские угодья, орошаемые поля;
- 5) *зоны с развитой растительностью* – вечнозеленые лиственные и хвойные деревья, сезонные лиственные и хвойные деревья, сезонные широколиственные деревья, вечнозеленые широколиственные деревья, степной ландшафт с высокими травами, тундра, болота и топи, вечнозеленые кустарники, сезонные кустарники, смешанные леса, лес/поле.

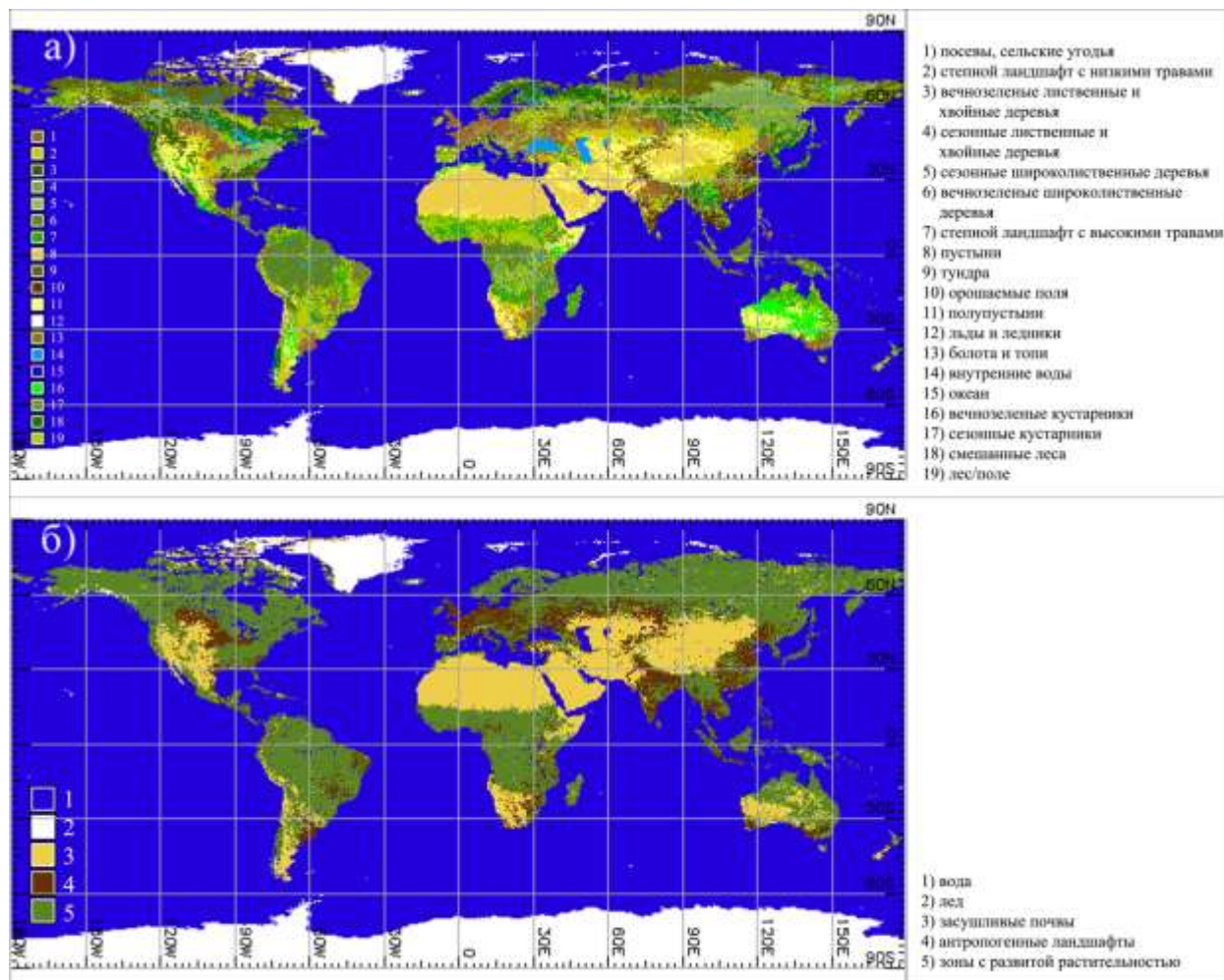


Рис. 1.3. Исходная растровая карта подстилающей поверхности с различными типами обмена «биосфера–атмосфера» (<http://edc2.usgs.gov/glcc/>) (а); переклассифицированная растровая карта, содержащая объединенные типы ландшафтов (б)

Для решения поставленных задач использовались результаты измерений

АОТ на длине волны солнечного излучения 0.5 мкм, выполненных в рамках программы аэрозольного мониторинга AERONET (<http://aeronet.gsfc.nasa.gov>) на Среднем Урале в 2004, 2006 и 2007 гг.

Для описания процессов дальнего переноса аэрозоля и динамики атмосферы использовались результаты расчетов семисуточных обратных траекторий движения воздушных частиц, выполняемых для пунктов мониторинга сети AERONET Т. Кучерой (НАСА, Годдардский центр космических полетов, США) и доступных на сайте <http://croc.gsfc.nasa.gov/aeronet/>.

Значениям АОТ, усредненным за 4 часа, ставились в соответствие обратные траектории движения воздуха на изобарической поверхности 950 гПа, пришедшие в пункт наблюдения в 12 часов по Гринвичу (17 часов местного времени). Каждая траектория представлялась упорядоченной последовательностью точек - векторных объектов, соответствующих положению лагранжевой частицы в пространстве в разные моменты времени.

1.4.2 Методика проведения анализа и полученные результаты

Так как классификация ландшафтов представлена в виде растровой карты, то для сопоставления с векторными объектами (траекториями движения воздуха) выполнялась ее векторизация. Области, соответствующие разным типам ландшафтов, преобразовывались в векторные площадные объекты [52], ограниченные замкнутыми полигонами. Далее проводилась фильтрация: для анализа сохранялись лишь достаточно крупные векторные объекты (площадь которых превосходит 10^5 км²), над которыми время пребывания воздушных частиц существенно для решаемой задачи (рис. 1.4).

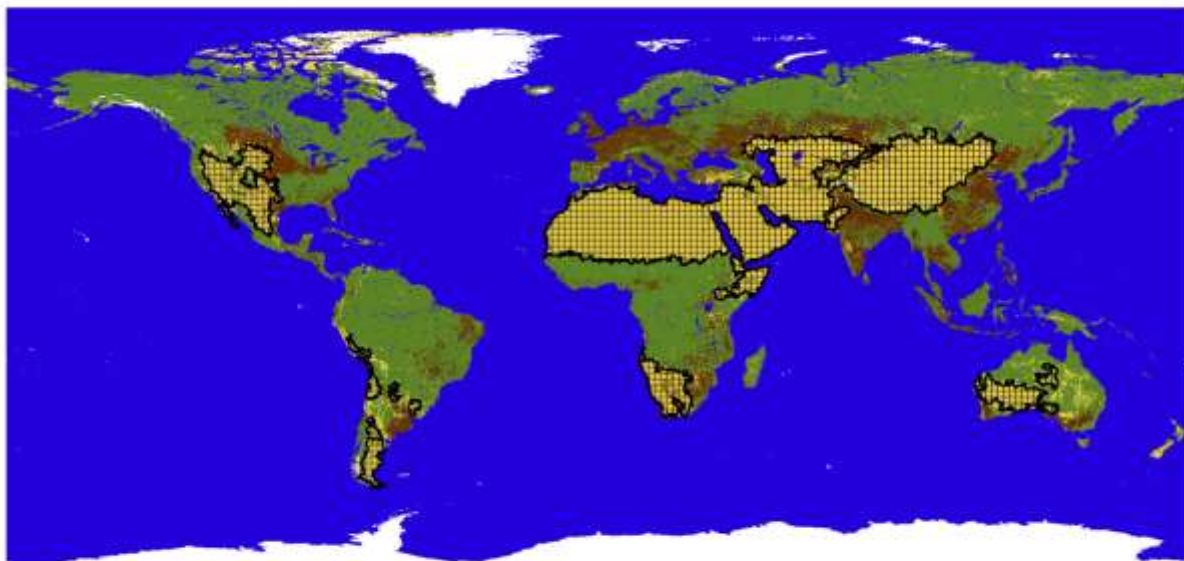


Рис. 1.4. Пример векторных объектов, представляющих области засушливых почв, после процедуры векторизации

Так как координаты точек траекторий движения воздушных частиц рассчитаны с постоянным шагом по времени 15 минут, то для оценки времени пребывания воздушного потока над территорией с тем или иным типом обмена «ландшафт–атмосфера» достаточно определить количество точек траектории над соответствующей областью пространства. Алгоритм перебора точек всех траекторий был автоматизирован средствами ГИС путем написания программы, содержащей последовательность нужных операций.

На рис. 1.5 а показаны результаты расчетов длительности движения воздушных частиц над тремя разными типами ландшафтов, где ось X – время нахождения траекторий над ландшафтами с развитой растительностью, ось Y – над засушливыми почвами, ось Z – над водной поверхностью. Каждая точка на графике представляет отдельную траекторию движения воздуха, а координаты точки – время движения в часах над соответствующим типом ландшафта. Видно, что подавляющее число траекторий большую часть своего пути провели над ландшафтами с развитой растительностью (ось X) и водной (ось Z) поверхностью. Число воздушных траекторий, поступивших в пункт мониторинга из областей засушливых почв, сравнительно невелико.

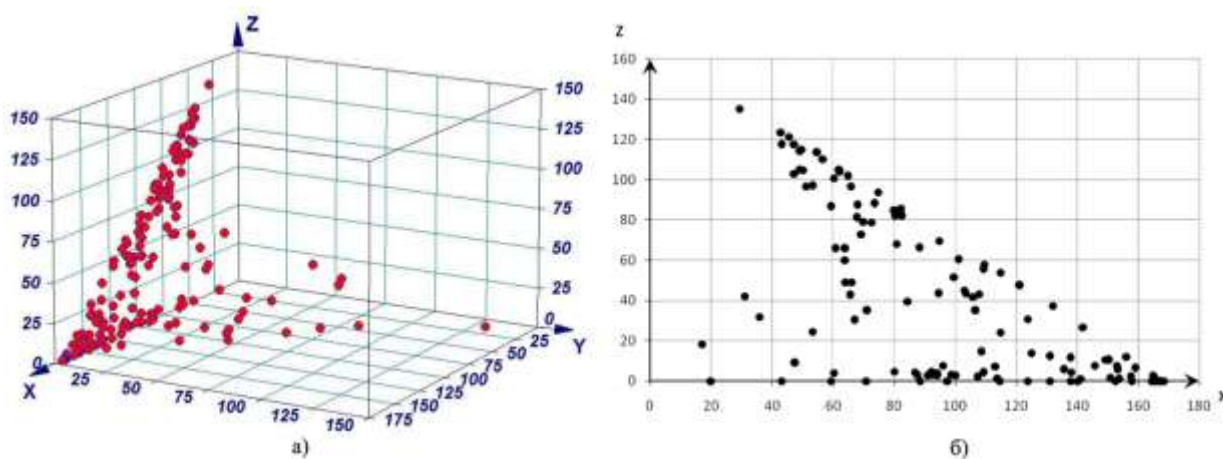


Рис. 1.5. Время нахождения (в часах) траекторий движения воздуха над территориями с различными механизмами обмена «ландшафт–атмосфера» (а): ось X – над областью с развитой растительностью, Y – над засушливыми почвами, Z – над водной поверхностью; время нахождения (в часах) траекторий движения воздуха над территорией с развитой растительности (ось X) и над водной поверхностью (ось Z) (б)

На рис. 1.5 б показана одна из проекций трехмерного графика рис. 1.5 а. Несмотря на континентальное расположение станции мониторинга на Среднем Урале, сравнительно много воздушных частиц длительное время двигались над водной поверхностью. Анализ пространственного расположения таких траекторий показывает, что в основном они пришли с акватории морей Арктического бассейна Северного Ледовитого океана.

Тот факт, что все точки на рисунке лежат ниже условной диагонали графика объясняется тем, что суммарное время пребывания траектории над всеми типами ландшафтов не превышает семи суток (т. е. сумма значений координат меньше некоторой константы). Точки, лежащие на диагонали, соответствуют траекториям, которые проходили только над территориями с развитой растительностью и водной поверхностью. На ось X попали точки, соответствующие тем траекториям, которые не проходили вовсе над водными объектами. Очевидно, что отсутствуют точки, лежащие на оси Z, так как такие точки характеризовали бы траектории, не проходящие над территориями с развитой растительностью, в то время как станция мониторинга, для которой анализировались траектории, занимает глубоко континентальное положение.

Разбивая все множество траекторий на пары выборок (группа, проходившая над анализируемым типом ландшафта и группа, не проходившая над этим ландшафтом), можно определить статистические характеристики АОТ в каждой группе. Считалось, что траектория воздушной частицы проходила над определенным ландшафтом, если время пребывания над ним превышало 1 час.

Основные статистические характеристики АОТ для каждой пары выборок приведены в табл. 1.4. Так как точка наблюдений находится в лесном массиве, то выборка траекторий, проходивших над территориями с развитой растительностью, совпадает со всем множеством траекторий. Таким образом, имеющиеся данные позволяют сравнивать между собой только три типа ландшафтов из пяти классов.

Сравнение значений медиан разных выборок показывает, что траекториям, проходящим над территориями засушливых почв и над обрабатываемыми почвами, соответствует больший сигнал, чем траекториям, которые не проходят над этими типами ландшафтов. Наибольшее значение медианы АОТ наблюдается для тех воздушных потоков, которые при своем движении к станции мониторинга проходили над антропогенно-измененными ландшафтами.

Таблица 1.4. Основные статистические характеристики АОТ 0.5 мкм для разных выборок

Характеристика	Все множество траекторий	Траектории проходят над засушливыми почвами		Траектории проходят над водной поверхностью		Траектории проходят над обрабатываемыми почвами	
		Да	Нет	Да	Нет	Да	Нет
Минимум	0.03	0.04	0.03	0.03	0.05	0.03	0.04
1 ^й квартиль	0.09	0.12	0.08	0.09	0.11	0.11	0.08
Медиана	0.16	0.17	0.14	0.16	0.17	0.18	0.13
Среднее	0.21	0.25	0.19	0.22	0.19	0.26	0.16
3 ^й квартиль	0.27	0.32	0.23	0.28	0.25	0.33	0.20
Максимум	1.15	1.15	1.08	1.15	0.67	1.15	1.08
Дисперсия	0.03	0.04	0.03	0.04	0.02	0.04	0.02

Различие пар указанных выборок статистически достоверно, поскольку величины уровней значимости, рассчитанные по непараметрическому

U- критерию Манна-Уитни, меньше 0.05. Для выборок, относящихся к засушливым почвам, $\alpha=0.013$, а для обрабатываемых почв, $\alpha=0.001$.

Выборки, траектории которых проходили или не проходили над водной поверхностью, статистически не различимы. Вероятно, это связано с континентальным размещением станции мониторинга на Среднем Урале. Эти траектории длительное время находятся над другими типами ландшафтов, что приводит к нивелированию специфических для водных объектов характеристик аэрозольного наполнения атмосферы.

Таким образом, установлено, что исходное предположение о зависимости АОТ от типов ландшафтов, над которым проходили воздушные потоки до их прибытия в пункт мониторинга, является справедливым. Для континентальной станции мониторинга на Среднем Урале существует статистически значимая зависимость измеренных значений АОТ от того, проходили ли воздушные частицы над территориями засушливых почв или над антропогенно-измененными ландшафтами, обрабатываемыми землями.

Так как длительности пребывания траекторий над разными типами ландшафтов меняются в широких пределах, то разработанная методика позволяет выполнить оценку зависимости АОТ от времени движения воздушных потоков над анализируемым типом ландшафта. Для этого были построены зависимости значений сигналов АОТ от времени пребывания траекторий над территориями с тем или иным типом обмена «ландшафт–атмосфера». Затем были определены коэффициенты уравнений линейной регрессии, а также найдены значения коэффициентов детерминации этих зависимостей. Оказалось, что для всех графиков линии регрессии имеют очень малые углы наклона, а значения коэффициентов детерминации малы ($R^2 \ll 1$), т. е. линии регрессии очень слабо отражают искомые зависимости. Следовательно, на множестве результатов измерений для станции мониторинга на Среднем Урале не удалось установить статистически значимой зависимости значений АОТ от времени пребывания траекторий над тем или иным типом ландшафта.

Этот результат может быть следствием того, что между атмосферой и

подстилающим ландшафтом быстро устанавливается динамическое равновесие. Сток аэрозоля из атмосферы на поверхность и его генерация с поверхности взаимно уравниваются, что не позволяет установить искомую зависимость с помощью сделанных выше достаточно грубых оценок.

Основные результаты главы 1

1. Приведен краткий обзор существующих методов, использующих обратные траектории движения воздуха в качестве информации о динамике атмосферы, для интерпретации данных измерений содержания примесей в атмосфере.

2. На основе результатов фотометрических измерений сети AERONET выполнена оценка потоков атмосферного аэрозоля в шести точках мониторинга, расположенных в различных географических зонах России. Для каждого пункта мониторинга найдены направления преобладающего переноса воздушных потоков, а также направления скоростей ветра, при которых реализуются максимальные и минимальные значения объемных концентраций и плотностей потоков аэрозоля. Наибольшие значения концентрации и плотности потока аэрозоля были выявлены для точки мониторинга, расположенной в Уссурийске (максимальные нормированные значения равны 4.20 и 1.80 соответственно и реализуются при южном направлении переноса). В Якутске наблюдаются самые низкие уровни концентрации и плотности потока аэрозоля (1.98 и 0.76 соответственно).

3. Предложена методика, позволяющая проводить совместный анализ результатов измерений аэрозольной оптической толщи атмосферы и обратных траекторий движения воздушных потоков. С помощью инструментов геоинформационных технологий на примере анализа результатов измерений на Среднем Урале впервые удалось выявить статистически достоверное влияние различных типов ландшафтов на аэрозольную оптическую толщину атмосферы. Установлено, что аэрозольные оптические характеристики атмосферы статистически значимо зависят от того, над территориями с какими типами ландшафтов проходили траектории движения воздушных потоков до прихода в

пункт мониторинга. Медианные значения АОТ, измеренные в случае прихода воздушных потоков, траектории которых проходили над засушливыми почвами (0.17) и обрабатываемыми территориями (0.18), статистически значимо выше медиан АОТ, измеренных в моменты прихода потоков, не проходивших над данными типами ландшафтов (0.14 и 0.13 соответственно).

4. На основе результатов спектральных фотометрических измерений на Среднем Урале не удалось выявить статистически значимой зависимости АОТ от времени пребывания траекторий движения воздуха над проанализированными типами ландшафтов.

Глава 2 Метод флюид-локации атмосферы

Совместный анализ обратных траекторий движения воздушных потоков и результатов измерений параметров атмосферы позволяет получать более обширную информацию о содержании атмосферных примесей, нежели описанные в первой главе методы. Например, методы статистики обратных траекторий (COT) позволяют на основе локальных измерений в одном или нескольких пунктах мониторинга и информации о динамике атмосферы восстанавливать пространственную структуру измеряемого параметра. Такая возможность основывается на двух положениях: 1) информация о поступлении примеси в атмосферу переносится к прибору из других пространственных областей благодаря движению воздушных потоков; 2) «пересечение» (прохождение над одной и той же территорией в разное время) траекторий движения воздушных частиц, несущих различные значения сигнала, позволяет локализовать области пространства с вероятно более высоким уровнем измеряемого признака.

2.1 Методы статистики обратных траекторий

Методы статистики обратных траекторий (COT) [12–14] были разработаны для решения задач оценки пространственной структуры полей измеряемой величины по данным локальных приборных измерений, выполненных в одной или нескольких фиксированных точках за большой период времени. Возможность оценки полей по данным измерений в отдельной точке реализуется за счет вовлечения в анализ информации о динамике атмосферных потоков.

Существующие методы COT условно можно разделить на три класса:

- методы Л. Эшбо – часто называемые методом расчета функции потенциального вклада источников [13];
- методы П. Зайберт – для расчета среднего поля концентраций [14];
- методы А. Штоля – для расчета распределенного среднего поля концентраций [15].

В любом из вариантов метода COT вся анализируемая территория разбивается неподвижной (эйлеровой) сеткой на множество фиксированных объемных ячеек. Важной составляющей всех методов COT является набор обратных траекторий. Расчет обратных траекторий начинается с момента выполнения измерения и производится с постоянным отрицательным шагом по времени. С каждой траекторией сопоставляется значение концентрации, характеризующей наличие примеси в атмосфере, измеренной в точке старта траектории. Переход от множества лагранжевых траекторий движения воздуха и связанных с ними результатов измерений к неподвижной эйлеровой расчетной сетке осуществляется с помощью различных статистических процедур усреднения и фильтрации (сглаживания) по тем точкам траекторий, которые находятся в соответствующей эйлеровой ячейке.

Первый вариант метода статистики обратных траекторий был предложен в 1983 г. Л. Эшбо [13]. Он основывается на нахождении так называемой функции потенциального вклада источника, которая по своей сути является условной вероятностью того, что траектория, проходившая через некоторую ячейку пространства, принесла в точку мониторинга повышенную концентрацию исследуемого вещества.

Пусть n_{ij} – число точек траекторий, приходящихся на ячейку сетки i,j (здесь для простоты рассматривается двумерная сетка), а m_{ij} – число точек тех траекторий, проходящих через ячейку i,j , которые принесли в точку мониторинга сигнал выше некоторого априори заданного значения. В методе Эшбо для каждой эйлеровой ячейки поля течения вычисляется и анализируется *функция потенциального вклада источника* (Potential Source Contribution Function - PSCF) вида:

$$P_{ij} = \frac{m_{ij}}{n_{ij}}. \quad (2.1)$$

Считается, что перемещение траектории над ячейкой с большим значением P_{ij} с большей вероятностью приведет к появлению высокой концентрации рассматриваемого компонента в пункте мониторинга. Пространственное

распределение P_{ij} предоставляет статистическую информацию о местах нахождения потенциальных источников.

Результаты, полученные методом Эшбо, нельзя считать исчерпывающими, поскольку вывод о наличии или отсутствии источника поступления примеси в эйлеровой ячейке дается на основе подсчета числа траекторий, ассоциированных с высоким значением измеренного параметра (т. е. числа измерений, результаты которых превышают некоторый заданный уровень), и не учитывает все множество самих результатов измерений.

Разработанный в 1994 г. *метод П. Зайберт* [14] основывается на анализе всего множества значений результатов измерений и связанного с ним множества траекторий движения воздушных частиц. В каждой эйлеровой ячейке пространства рассчитывается среднее значение логарифма концентраций примесей, переносимых воздушными частицами через анализируемую ячейку.

Пусть прибор в точке наблюдения измеряет массовую концентрацию некоторой примеси в атмосферном воздухе. В соответствии с основной идеей, предложенной Зайберт, для каждой ячейки эйлеровой сетки вычисляется величина:

$$\bar{\varphi}_{ij} = \frac{1}{\sum_l^M \tau_{ijl}} \sum_l^M \log(\varphi_l) \tau_{ijl} , \quad (2.2)$$

где i и j – индексы, определяющие ячейку пространственной решетки;

l – номер траектории;

M – общее количество траекторий;

φ_l – концентрация, измеренная прибором в момент прихода траектории l в точку наблюдения;

τ_{ijl} – время пребывания траектории l в ячейке i, j .

Как показывают численные эксперименты, рассчитанное поле распределения величины (2.2) содержит несущественные отклонения значений в соседних ячейках пространства – случайный шум. Для его исключения используются различные приемы фильтрации данных. В оригинальном методе в каждой ячейке для определенной по формуле (2.2) величины рассчитывается с

использованием t -статистики (т. е. неявно предполагается, что логарифм концентрации имеет нормальное распределение) 95% доверительный интервал и проводится сглаживание рассчитанной функции 9-точечным фильтром с условием, что рассчитанные значения должны оставаться в пределах доверительного интервала. Сглаживание повторяется до тех пор, пока изменение поля концентраций не станет меньше предварительно заданной величины. По мнению автора, такая процедура гарантирует, что характерные изменения концентраций сохраняются, в то время как случайный шум будет удален. Другие авторы предлагают свои процедуры сглаживания, а также используют не среднее от логарифма, а сами средние по ячейке значения концентраций. Рассчитанная таким образом величина носит название *среднего поля концентрации*.

Как и в методе Эшбо, считается, что, чем больше значения найденной функции в некоторой области пространства, тем более вероятно, что в этой области пространства концентрация примеси имеет повышенное значение, а также более вероятно, что в этой области пространства находится источник загрязнения атмосферы. В работе [54] показано, эти статистические гипотезы хорошо оправдываются.

Метод Зайберт позволяет получить среднее поле распределения концентраций, при этом значения признака полагаются постоянными вдоль траекторий движения воздушных частиц. Таким образом, возникает явное физическое противоречие – рассогласование эйлера и лагранжева представлений описания движения воздушных потоков.

Метод А. Штоля [15], предложенный в 1996 г., направлен на улучшение метода Зайберт путем согласования пространственного распределения средней функции сигнала с распределениями значений измеряемого признака вдоль каждой из траекторий движения воздушных частиц. Поэтому в алгоритме расчетов этим методом на первом этапе используется метод Зайберт для вычисления среднего поля концентраций в нулевом приближении. После этого начинается процесс перераспределения концентрации примеси – полагается, что концентрация в произвольной точке траектории пропорциональна концентрации

(найденной на предыдущей итерации) в эйлеровой ячейке, через которую она проходит. При этом используются специально подобранные коэффициенты пропорциональности, равные отношению концентрации измеренной прибором (в момент прибытия рассматриваемой траектории в пункт наблюдения) к среднему значению концентраций во всех эйлеровых ячейках, через которые перемещалась анализируемая лагранжева частица. После того как перераспределение для всех траекторий завершено, заново рассчитывается среднее поле концентраций в каждой эйлеровой ячейке сетки с учетом изменения концентраций примеси вдоль траектории движения воздушных частиц.

Для удаления случайного шума используется прием, аналогичный методу Зайберт: нехарактерные колебания значений рассчитанного поля концентрации (для 99% доверительного уровня) устраняются 9-точечным фильтром. Описанная выше процедура повторяется до тех пор, пока средняя разница между полями концентраций двух последовательных итераций не станет ниже 0.5% [15].

Несмотря на то, что в методе Штоля осуществляется перераспределение значений концентрации примеси (измеряемого признака) вдоль траекторий движения воздушных частиц, применяемая при этом процедура носит в основном интуитивный, статистический характер и не предусматривает использование физико-математических моделей процессов переноса. Кроме того, общим недостатком как метода Штоля, так и других известных методов статистики обратных траекторий является сложность (или даже невозможность) учета физических и химических трансформаций, происходящих с веществом примеси в процессе переноса в атмосфере.

2.2 Общее описание метода флюид-локации атмосферы

В настоящей работе представлен новый метод анализа полей концентраций примесей в атмосфере – метод флюид-локации атмосферы (ФЛА), являющийся развитием методов СОТ и впервые описанный в работах [55–57]. В методе ФЛА, как и в других аналогичных методах, в качестве исходных данных используются:

- 1) наборы траекторий движения воздушных частиц, которые представляют

информацию о динамике атмосферы; 2) ряды приборных измерений в одной или нескольких точках мониторинга.

Впервые использовать результаты фотометрических измерений для оценки полей загрязнения методами COT было предложено в работе [58] на примере данных лидарного и радиометрического мониторинга аэрозоля в Минске и Бельске. В настоящей работе, помимо разработки нового метода ФЛА, этот подход расширен и для анализа использованы результаты обработки данных измерений уже шести пунктов AERONET наблюдений, расположенных на территории России с запада на восток: Звенигород, Москва, Екатеринбург, Томск, Якутск, Уссурийск.

Метод флюид-локации атмосферы является модификацией метода Штоля. Разработка метода ФЛА проводилась с целью заменить интуитивные процедуры сглаживания и фильтрации итерационным решением уравнений переноса примеси в атмосфере.

В реализации метода ФЛА можно выделить три этапа.

Этап статистической оценки среднего поля концентрации. На этом этапе, как и в методе Штоля, проводится оценка среднего поля измеряемого признака (например, концентрации вещества) на основе метода Зайберт, но без использования логарифмирования и статистического сглаживания.

Для расчета *среднего эффективного поля концентрации* измеряемого признака в эйлеровой ячейке пространства используется усреднение по времени в виде:

$$\bar{\varphi}_{ij} \stackrel{\text{def}}{=} \frac{1}{T_{ij}} \left(\sum_l \int_{t_{1l}}^{t_{2l}} \varphi_l dt \right)_{ij} \approx \left(\frac{1}{\sum_l \Delta t_l} \sum_l \sum_{k_l} \varphi_{k_l} \Delta t_{k_l} \right)_{ij}, \quad (2.3)$$

где T_{ij} – общее время пребывания всех траекторий в ячейке i,j ;

φ_l – значение признака на траектории l в ячейке i,j ;

Δt_l – время пребывания траектории l в ячейке i,j ; индексы i,j определяют эйлерову ячейку пространства; индекс l – номер лагранжевой частицы (траектории движения);

k_l – номер точки k на траектории l внутри соответствующей эйлеровой ячейки i, j ;

Δt_{k_l} – шаг по времени на траектории l (в данной работе принят постоянным и равен 15 минут).

Интегрирование выполняется по времени нахождения траекторий внутри соответствующей эйлеровой ячейки, а суммирование – по всем лагранжевым частицам (траекториям движения) и всем точкам каждой траектории внутри эйлеровой ячейки. Очевидно, что в пределе бесконечно большого числа лагранжевых частиц и бесконечно малых размеров эйлеровых ячеек используемое в формуле (2.3) усреднение по времени теоретически совпадает с обычно применяемым в гидрогазодинамике определением средней величины. В случае конечных размеров эйлеровых ячеек и конечного числа траекторий лагранжевых частиц (из-за ограниченности числа выполненных измерений) величина среднего эффективного поля (2.3) представляет собой лишь статистическую оценку поля средней величины концентрации на основе конечного (возможно малого) числа ее значений в конкретные моменты времени.

Этап Эйлера. На основе среднего эффективного поля концентраций и поля скоростей движения воздуха оценивается поле мощностей источников/стоков, для чего используется уравнение сохранения анализируемого (измеряемого прибором) признака φ в эйлеровом представлении:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + \nabla \cdot (\varphi \vec{v}) = J_\varphi, \quad (2.4)$$

где $(\varphi \vec{v})$ – плотность потока признака φ ;

$\vec{v} = \vec{v}(\vec{r}, t)$ – скорость движения воздуха;

J_φ – мощность источников/стоков признака.

Запись уравнения (2.4) для ячейки конечного объема выглядит следующим образом:

$$\frac{\partial \langle \varphi \rangle}{\partial t} + \frac{1}{V} \oint_S (\varphi \vec{v}) d\vec{S} = \langle J_\varphi \rangle, \quad (2.5)$$

где $\langle f \rangle = \frac{1}{V} \iiint_V f dV$ – усреднение некоторой величины f по объему эйлеровой ячейки;

S – площадь поверхности ячейки;

$d\vec{S} = \vec{n} dS$ – элемент площади, ориентированный «наружу» ячейки.

Уравнение (2.5) является точным уравнением сохранения, записанным в интегральной форме. Если поле признака φ известно, то уравнение можно использовать для вычисления мощностей источников и стоков, присутствующих в его правой части.

Считая среднее эффективное поле, найденное на первом этапе, оценкой пространственного распределения средней за период измерений концентрации, и используя (2.5), можно найти такое пространственное распределение поля источников, которое при известном поле скоростей ветра обеспечивает существование (согласно уравнению сохранения) этого исходного стационарного (усредненному по времени) поля концентраций.

Если считать, что в каждый момент времени прохождение воздушных частиц через соответствующую ячейку пространства соответствует «квазистационарному» состоянию (значение среднего по объему признака не меняется во времени – загрязнение остается в среднем неизменным), то уравнение (2.5) можно записать в разностной форме:

$$\langle \tilde{J}_\varphi \rangle \approx \frac{1}{V_{ij} \Delta t} \sum_k \sum_\sigma \bar{\varphi}_\sigma v_\sigma(t_k) \Delta t_k S_\sigma, \quad (2.6)$$

где $\tilde{f}$ – усреднение некоторой величины f по временному интервалу Δt ;

t_k – текущее (k -е) значение времени внутри периода усреднения;

$\Delta t_k = t_k - t_{k-1}$;

V_{ij} – объем эйлеровой ячейки;

$\bar{\varphi}_\sigma$ – значение среднего поля признака $\bar{\varphi}$ на границе σ ;

$v_\sigma(t_k)$ – значение проекции скорости ветра на внешнюю нормаль на границе σ в момент времени t_k ;

S_σ – площадь границы σ эйлеровой ячейки.

В зависимости от способа расчета значений признака $\bar{\varphi}_\sigma$ на границе эйлеровой ячейки можно получить различные разностные представления для расчета величины (2.6). Поскольку для нахождения $\tilde{J}_\varphi$ использовалось среднее поле $\bar{\varphi}$, то далее эта величина будет называться *средним полем источников*. Такое название подчеркивает, что при вычислении этой величины в формуле (2.6) использовались не истинные мгновенные значения концентраций, а усредненная (не изменяющаяся во времени) величина, являющаяся только оценкой этого поля – *среднее поле концентраций*.

Этап Лагранжа. На основе найденной оценки поля мощностей источников/стоков рассчитывается распределение сигналов вдоль каждой траектории движения лагранжевой частицы с использованием уравнения сохранения в соответствующей форме. Дифференциальная запись уравнения сохранения признака в форме Лагранжа имеет вид:

$$\frac{d \varphi(\vec{r}(t))}{dt} = J_\varphi(\vec{r}(t)). \quad (2.7)$$

Простейшая разностная форма для траектории с номером l записывается как:

$$\varphi_l^{t-\Delta t} = \varphi_l^t - \langle \tilde{J}_\varphi \rangle \Delta t. \quad (2.8)$$

Уравнение (2.8) позволяет пересчитать в обратном по времени направлении значение анализируемого признака вдоль каждой траектории, начиная с момента, когда значение признака было известно, т. е. с момента выполнения измерения. Таким образом, значение признака перераспределяется в пространстве вдоль траекторий движения лагранжевых частиц, так как в каждый момент времени координаты точек траектории рассчитаны.

После выполнения третьего этапа расчетов получим множество траекторий движения лагранжевых частиц, для которых значения переносимого ими признака уже не постоянно вдоль траекторий (как это неявно предполагается в различных вариантах методов COT). Это позволяет снова провести уточняющую процедуру статистической оценки среднего поля концентраций и затем повторить расчеты с использованием уравнений сохранения, выполняя итерации до тех пор, пока различия полей концентраций и источников, полученных на двух соседних итерациях, не будут меньше заданной погрешности итерационных вычислений. В результате на заданной реализации поля ветра будут получены физически согласованные поля (представления Эйлера и Лагранжа должны давать идентичное описание движения сплошной среды), являющиеся оценками поля концентраций и поля источников загрязнения.

Следует отметить, что каждый из трех этапов основного алгоритма разрабатываемого подхода представляет собой относительно независимую задачу, каждая из которых может быть решена различными методами. На первом этапе необходимо решить задачу статистической оценки параметра на основе выборки его значений конечного объема, что можно сделать разными способами, используя известные методы статистики (например, учитывая дополнительную информацию о виде функции распределения концентрации примеси, как это делается в оригинальном методе Зайберт [14]).

На втором этапе решается задача расчета поля источников по заданному полю концентрации примеси в движущейся среде. При решении этой задачи можно использовать различные способы усреднения по времени и разные способы определения поля скоростей ветра. Так, например, можно потребовать выполнение уравнения неразрывности за весь период анализа, т. е. на каждой итерации для каждой эйлеровой ячейки выполнять численное усреднение за несколько лет. При этом для нахождения скоростей движения воздуха необходимо либо выполнить за этот период времени прямое моделирование динамики атмосферы, либо использовать интерполяцию данных реанализа. В расчетах упрощенной демонстрационной задачи, решаемой ниже, использован

другой подход: на этапе Эйлера предполагается выполнение закона сохранения массы только за ограниченный период времени – суммарное время прохождения всех учитываемых лагранжевых частиц (обратных траекторий) через рассматриваемую эйлерову ячейку, т. е. в формуле (2.6) $\Delta t = \sum_l \Delta t_l$. Это позволило упростить расчеты путем использования известных значений скоростей движения воздуха на соответствующих обратных траекториях. При таком подходе формула (2.6) принимает вид:

$$\langle \tilde{J}_\varphi \rangle \approx \frac{1}{V_{ij} \sum_l N_{ij}^l} \sum_l \sum_{k_l} \sum_{\sigma} \bar{\varphi}_{\sigma} (v_{\sigma})_{k_l} S_{\sigma}, \quad (2.9)$$

где V_{ij} – объем эйлеровой ячейки;

N_{ij}^l – число точек траектории l внутри ячейки i, j ;

l – номер траектории;

$(v_{\sigma})_{k_l}$ – значение проекции скорости лагранжевой частицы на внешнюю нормаль к границе σ , соответствующее точке k_l (т. е. в определенный момент времени).

На третьем этапе решается задача определения изменения концентрации примеси вдоль траектории движения лагранжевой частицы в известном поле скоростей ветра и при известном распределении источников. В данной работе эта задача решается на множестве обратных траекторий движения воздушных частиц, начинающихся от места расположения прибора, т. е. от точки с известной (измеренной) концентрацией примеси.

Включение в предлагаемый метод этапа решения уравнений сохранения признака позволяет развивать предложенную методику в направлении учета реальных физико-химических процессов, происходящих с аэрозолем в атмосфере (гравитационное, сухое и влажное осаждения; физико-химические трансформации; турбулентная диффузия и др.). Таким образом, предлагаемый метод позволяет совместно использовать в расчетной схеме как результаты прямых приборных измерений, так и теоретические физико-химические модели рассматриваемого процесса переноса вещества в атмосфере.

Нужно заметить, что в тех задачах, где задаются или известны значения измеряемого признака на границах расчетной области, в полное множество анализируемых траекторий движения воздушных частиц можно включать не только обратные, но и прямые траектории. При этом обратные траектории должны начинаться с точки (точек), где располагается измерительный прибор, а прямые траектории должны рассчитываться начиная с точек (областей) пространства, где заданы граничные условия (и/или мощности источников выбросов в атмосферу). Таким образом, разработанный метод допускает развитие в направлении его интеграции с традиционными методами моделирования при решении задач о распространении загрязняющих веществ в атмосфере.

2.3 Особенности численной реализации метода

Решение задачи оценки поля средней концентрации аэрозоля методом ФЛА включает следующую последовательность действий:

- формирование множества результатов измерений за достаточно большой промежуток времени, обеспечивающий максимально возможное разнообразие метеорологических ситуаций в пункте (пунктах) наблюдений;
- расчет множества обратных траекторий движения лагранжевых воздушных частиц, прибывающих в точку расположения прибора (приборов) в моменты проведения измерений;
- расчеты методом ФЛА с реализацией на каждой итерации трех этапов вычислений:
 - статистическая оценка среднего эффективного поля измеряемого признака (метод COT) на заданном множестве траекторий и связанном с ним множестве данных измерений;
 - расчет среднего эффективного поля источников – оценка поля мощностей источников признака (уравнение сохранения в представлении Эйлера);
 - перераспределение значений признака вдоль траекторий движения лагранжевых частиц (уравнение сохранения в представлении Лагранжа).

В начале расчета при первой статистической оценке среднего эффективного поля концентраций считается, что значения вдоль траекторий лагранжевых частиц не меняются, т. е. в формуле (2.3) полагается $\varphi_{k_l} = \text{const}$ (аналогично формуле Зайберт).

Полученное таким образом поле концентраций позволяет провести первичную оценку средних мощностей источников/стоков в эйлеровой ячейке на основе составления баланса потоков через границы ячейки согласно формуле (2.9). В квазидвумерном приближении, использованном в данной работе, потоки аэрозоля рассчитываются на основе поля горизонтальных скоростей ветра через эйлеровую ячейку. В рассматриваемом приближении эйлеровая ячейка представляет собой прямую призму с высотой H , в основании которой лежит равнобедренная трапеция, с длинами сторон – a_1, a_2, a_3, a_4 (рис. 2.1). На рис. 2.1 обозначены единичные нормальные векторы к каждой из сторон трапеции – $\vec{n}_1, \vec{n}_2, \vec{n}_3, \vec{n}_4$; высота трапеции – h .

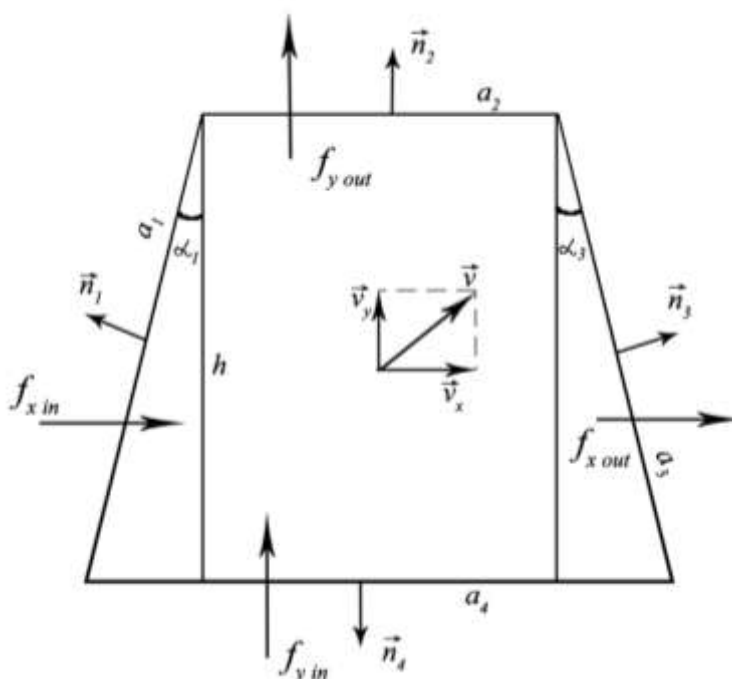


Рис. 2.1. Проекция эйлеровой ячейки на поверхность Земли

Длины сторон трапеции вычислялись как расстояния между двумя точками на сфере по формуле гаверсинусов [59]:

$$\Delta\sigma = 2\arcsin \left\{ \sqrt{\sin^2 \left(\frac{\phi_2 - \phi_1}{2} \right) + \cos\phi_1 \cos\phi_2 \sin^2 \left(\frac{\lambda_2 - \lambda_1}{2} \right)} \right\}, \quad (2.10)$$

где $\Delta\sigma$ – угловая разница координат двух точек, определяющих вершины трапеции в географической системе координат. Для перевода углового расстояния в метрическое нужно $\Delta\sigma$ умножить на радиус Земли ($R_3 = 6370997$ м);

$\phi_1, \lambda_1, \phi_2, \lambda_2$ – широта и долгота соответствующих точек в радианах.

Раскладывая вектор горизонтальной скорости $\vec{v}$ на две составляющие $\vec{v}_x, \vec{v}_y$ в декартовой системе координат, связанной с текущей расчетной эйлеровой ячейкой, и оценивая значения признака на границах этой ячейки ($\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4$), рассчитываем меридиональные f_x и широтные f_y потоки, входящие (индекс *in*) в ячейку и выходящие (индекс *out*) из нее. Рассмотрим случай, когда $\vec{v}_x > 0, \vec{v}_y > 0$, который представлен на рис. 2.1. Меридиональный входящий поток $f_{x \text{ in}}$ равен:

$$f_{x \text{ in}} = \iint_{S_1} \varphi_1 \vec{v}_x \vec{n}_1 dS = \varphi_1 v_x \cos\alpha'_1 S_1 = -\varphi_1 v_x \cos\alpha_1 a_1 H = -\varphi_1 v_x h H, \quad (2.11)$$

где S_1 – площадь «левой» грани ячейки, $S_1 = a_1 H$;

φ_1 – значение признака на границе ячейки;

$\vec{n}_1$ – внешняя нормаль к грани ячейки;

α'_1 – угол между нормалью $\vec{n}_1$ и вектором компоненты скорости $\vec{v}_x$;

a_1 и h – длина «левой» стороны и высота трапеции, проекции эйлеровой ячейки;

α_1 – угол между высотой трапеции и ее «левой» стороной;

$\cos\alpha'_1 = \cos(\pi - \alpha_1) = -\cos\alpha_1$;

H – высота эйлеровой ячейки.

Меридиональный выходящий поток $f_{x \text{ out}}$:

$$f_{x \text{ out}} = \iint_{S_3} \varphi_3 \vec{v}_x \vec{n}_3 dS = \varphi_3 v_x \cos \alpha'_3 S_3 = \varphi_3 v_x \cos \alpha_3 a_3 H = \varphi_3 v_x h H, \quad (2.12)$$

где индекс «3» обозначает «правую» грань эйлеровой ячейки;

α'_3 – угол между нормалью $\vec{n}_3$ и вектором компоненты скорости $\vec{v}_x$;

α_3 – угол между высотой трапеции и ее «правой» стороной, $\alpha'_3 = \alpha_3$.

Широтный входящий поток $f_{y \text{ in}}$:

$$f_{y \text{ in}} = \iint_{S_4} \varphi_4 \vec{v}_y \vec{n}_4 dS = \varphi_4 v_y \cos 180^\circ S_4 = -\varphi_4 v_y a_4 H. \quad (2.13)$$

В отличие от $f_{x \text{ in}}, f_{x \text{ out}}, f_{y \text{ in}}$ выходящий широтный поток будет проходить не через одну грань, а через три: a_1, a_2, a_3 , следовательно, $f_{y \text{ out}}$ записывается как:

$$\begin{aligned} f_{y \text{ out}} &= \iint_{S_1} \varphi_1 \vec{v}_y \vec{n}_1 dS + \iint_{S_2} \varphi_2 \vec{v}_y \vec{n}_2 dS + \iint_{S_3} \varphi_3 \vec{v}_y \vec{n}_3 dS \\ &= \varphi_1 v_y \cos \alpha''_1 S_1 + \varphi_2 v_y \cos 0^\circ S_2 + \varphi_3 v_y \cos \alpha''_3 S_3 \\ &= \varphi_1 v_y \sin \alpha_1 a_1 H + \varphi_2 v_y a_2 H + \varphi_3 v_y \sin \alpha_3 a_3 H \\ &= \varphi_2 v_y a_2 H + (\varphi_1 + \varphi_3) \left(\frac{a_4 - a_2}{2} \right) v_y H, \end{aligned} \quad (2.14)$$

где индексы «2» и «4» обозначают «верхнюю» и «нижнюю» стороны трапеции, соответственно;

α''_1, α''_3 – углы между вектором компоненты скорости $\vec{v}_y$ и нормальями $\vec{n}_1$ и $\vec{n}_3$,

соответственно;

$$\cos \alpha''_1 = \cos \left(\frac{\pi}{2} - \alpha_1 \right) = \sin \alpha_1; \quad \cos \alpha''_3 = \cos \left(\frac{\pi}{2} - \alpha_3 \right) = \sin \alpha_3; \quad \alpha_1 = \alpha_3;$$

$$a_1 = a_3; \quad a_1 \sin \alpha_1 = \left(\frac{a_4 - a_2}{2} \right).$$

Средняя мощность источников/стоков равна сумме потоков $f_{x \text{ in}}, f_{x \text{ out}}, f_{y \text{ in}}$ и $f_{y \text{ out}}$ всех точек траекторий, проходящих через ячейку, деленной на объем рассматриваемой ячейки V и число всех точек:

$$\begin{aligned}
\langle \tilde{J}_\varphi \rangle &= \frac{1}{V \sum_l N^l} \sum_l \sum_{k_l} (f_{x \text{ in}}^{k_l} + f_{x \text{ out}}^{k_l} + f_{y \text{ in}}^{k_l} + f_{y \text{ out}}^{k_l}) \\
&= \frac{1}{\frac{1}{2}(a_2 + a_4) \sum_l N^l} \sum_l \sum_{k_l} \left[v_x^{k_l} (\varphi_3 - \varphi_1) \right. \\
&\quad \left. + \frac{v_y^{k_l}}{h} \left(\varphi_2 a_2 - \varphi_4 a_4 + (\varphi_1 + \varphi_3) \left(\frac{a_4 - a_2}{2} \right) \right) \right],
\end{aligned} \tag{2.15}$$

где $V = \frac{1}{2}(a_2 + a_4)hH$ – объем эйлеровой ячейки;

N^l – число точек траектории l внутри ячейки.

Для того чтобы использовать формулу (2.15) в расчетном алгоритме, необходимо определить значения признаков на границах расчетной ячейки $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4$. В зависимости от способа расчета этих величин можно получить различные конечно-разностные аппроксимации.

С точки зрения численной реализации метода ФЛА и вычислительного алгоритма следует сделать три важных замечания – о выборе разностной аппроксимации исходных уравнений; о выборе размеров эйлеровой сетки; о необходимости подбора итерационного алгоритма, обеспечивающего сходимость вычислительного процесса.

Поскольку в предлагаемом варианте метода ФЛА уравнения сохранения решаются с использованием конечно-разностных схем, то важным для обеспечения устойчивости и сходимости численного алгоритма становится выбор разностных представлений для присутствующих в уравнениях (2.4) и (2.7) операторов. Значение признака на границах эйлеровой ячейки $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4$ можно задавать по-разному. В различных вариантах методов статистики обратных траекторий сходимость итерационных процедур обеспечивается тем или иным способом сглаживания среднего поля концентрации – без этого, как показывает тестовое моделирование, численные алгоритмы дают расходящиеся решения. В данном случае выбор разностных представлений и итерационной схемы осуществлялся путем проведения множества численных экспериментов,

что позволило выбрать из множества различных вариантов устойчивый, сходящийся вычислительный алгоритм. Значения концентраций на границах вычислялись по следующему правилу: для входящего потока значение признака на границе равно среднему значению концентраций в рассматриваемой ячейке и соседней ячейке, из которой пришел поток; для выходящего из ячейки потока значение признака на границе задавалось равным концентрации в самой ячейке.

Особенностью всех методов COT, включая метод ФЛА, является то, что нельзя произвольно уменьшать размеры эйлеровой сетки, к чему стремятся при прямом моделировании движения в задачах динамики жидкости и газа. Такое ограничение возникает из-за использования процедуры усреднения на первом этапе расчетов. Для обеспечения приемлемой оценки средней концентрации каждая эйлерова ячейка должна содержать достаточно большое количество проходящих через нее траекторий. Поэтому размеры ячеек эйлеровой сетки, с одной стороны, должны быть как можно меньше, чтобы обеспечить необходимое пространственное разрешение, а с другой – они не могут быть сколь угодно малыми из-за анализа конечного числа траекторий движения лагранжевых частиц.

Следует оговорить также выбор итерационного оператора. Последний этап вычислений на отдельной итерации – перераспределение концентраций вдоль каждой траектории согласно уравнению (2.8), после чего уточняется среднее поле концентраций и все этапы повторяются. Средняя мощность источника/стока в ячейке на текущей итерации $\langle \tilde{J}_\varphi \rangle_{it}$ определяется как:

$$\langle \tilde{J}_\varphi \rangle_{it} = \begin{cases} \langle \tilde{J}_{\varphi_{it}} \rangle, & it = 0 \\ \langle \tilde{J}_\varphi \rangle_{it-1} + k_{it} (\langle \tilde{J}_{\varphi_{it}} \rangle - \langle \tilde{J}_\varphi \rangle_{it-1}), & it \geq 1 \end{cases} \quad (2.16)$$

где $\langle \tilde{J}_\varphi \rangle_{it}$ – искомая средняя мощность источников/стоков на текущей итерации it ;

$\langle \tilde{J}_{\varphi_{it}} \rangle$ – средняя мощность источников/стоков, рассчитанная по формуле (2.15)

для значений признака на текущей итерации φ_{it} ;

$\langle \tilde{J}_\varphi \rangle_{it-1}$ – средняя мощность источников/стоков, на предыдущей итерации $it-1$.

С помощью выполнения множества тестовых задач, численных

экспериментов для обеспечения сходимости итерационного процесса был подобран коэффициент равный: $k_{it}=0.2$.

Таким образом, в соответствии с используемыми физическими законами сохранения происходит перераспределение значений измеряемой величины как в пространстве сетки Эйлера, так и вдоль каждой траектории движения. Поскольку в методе ФЛА используется уравнение баланса вещества, то данный метод может быть применен только к тем физическим величинам, для которых справедливы уравнения сохранения.

2.4 Исходные данные для моделирования средних полей концентраций аэрозоля

Для демонстрации возможностей метода ФЛА в настоящей работе решалась упрощенная задача о нахождении поля концентрации атмосферного аэрозоля по данным фотометрических наблюдений в 2004–2010 гг. в шести пунктах аэрозольного мониторинга (AERONET) на территории России. В качестве признака, для которого решались уравнения сохранения, использовались объемные концентрации аэрозоля, восстановленные численным интегрированием из функции распределения аэрозольных частиц по размерам, доступные на сайте <http://aeronet.gsfc.nasa.gov> (рис. 2.2). [60] При расчете объемных концентраций выделялись две фракции: тонкодисперсная (частицы с радиусом $r < 0.76$ мкм) и грубодисперсная ($0.76 < r < 15$ мкм). Для моделирования полей аэрозольного наполнения атмосферы, формируемых дальним переносом (характерные размеры расчетной области – несколько тысяч километров), использовались значения концентраций только тонкодисперсной фракции аэрозоля. Стоит отметить, что функция распределения восстанавливается не для каждого измерения АОТ. Для измерения величины АОТ достаточным условием является отсутствие заслоняющей облачности в области солнечного диска. При этом для решения задачи восстановления функции распределения аэрозольных частиц по размерам измеряются оптические характеристики атмосферы в альмукантарате Солнца, т. е. весь небесный свод должен быть преимущественно свободен от облачности.

Существуют также алгоритмы расчета микрофизических свойств аэрозоля на основе спектральной зависимости АОТ и априорного задания показателя преломления. [61, 62]

Из всех станций AERONET, расположенных в России, были выбраны Звенигород, Москва, Екатеринбург, Томск, Якутск, Уссурийск, для которых: 1) есть продолжительные ряды наблюдений с 2004 по 2010 г.; 2) рассчитаны функции распределения аэрозоля по размерам; 3) выполняются расчеты обратных траекторий движения частиц (см. ниже).

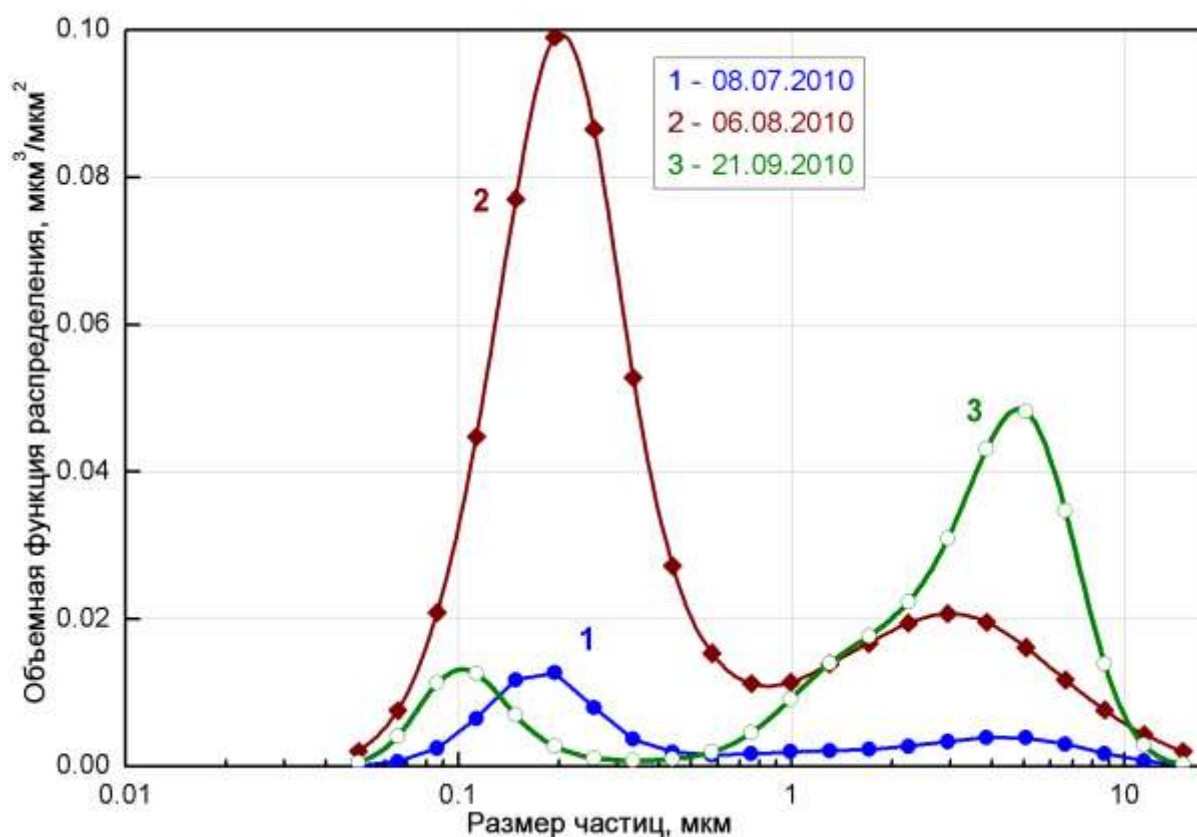


Рис. 2.2. Функции распределения аэрозольных частиц по размерам, восстановленные по результатам измерений в отдельные дни 2010 г. (<http://aeronet.gsfc.nasa.gov>)

Для учета имеющихся данных об обратных траекториях движения воздушных частиц и уменьшения объемов вычислений проводилось усреднение разовых измерений, и полученная среднедневная концентрация тонкодисперсного аэрозоля в дальнейшем использовалась при моделировании. Основные статистические характеристики полученных таким образом исходных данных, нормированные для удобства на медианное значение среднедневной

концентрации тонкодисперсного аэрозоля в Екатеринбурге ($0.025 \text{ мкм}^3/\text{мкм}^2$), приведены в табл. 2.1.

Отметим следующие особенности исходных данных: выборка по Звенигороду начинается позже других – в 2006 г., а выборки по Томску и Екатеринбургу заканчиваются раньше других – в апреле 2010 г.

Таблица 2.1. Статистические характеристики рядов среднедневных концентраций тонкодисперсного аэрозоля по каждому пункту наблюдения

Характеристика	Звенигород	Москва	Екатеринбург	Томск	Якутск	Уссурийск	Все станции
Число измерений	386	811	396	571	525	314	3003
Минимум	0.25	0.16	0.17	0.15	0.14	0.15	0.14
1 ^й квартиль	0.67	0.67	0.60	0.60	0.45	0.68	0.60
Медиана	1.06	1.19	1.00	0.90	0.74	1.01	0.98
Среднее	1.55	1.51	1.20	1.20	0.97	1.52	1.32
3 ^й квартиль	1.83	1.97	1.57	1.44	1.17	1.85	1.62
Максимум	11.72	14.07	5.21	13.46	7.65	12.80	14.07

Важной особенностью метода ФЛА является учет множества обратных траекторий движения воздушных частиц за период проведения измерений по каждому пункту мониторинга. Для обработки данных измерений сети AERONET использовались траектории, рассчитанные Т. Кучерой (GSFC/NASA) и представленные на сайте <http://croc.gsfc.nasa.gov/aeronet>. Использовались семисуточные обратные траектории на изобарической поверхности 950 гПа, что соответствует высоте около 500 м в пункте выполнения измерений.

Каждая траектория представляет собой набор точек, соответствующих положению лагранжевой частицы в пространстве в различные моменты времени, рассчитанные с шагом в 15 минут. В качестве иллюстрации множества используемых обратных траекторий и их протяженности в пространстве на рис. 2.3 показаны траектории ограниченной длительности за 2010 г. на изобарической поверхности 950 гПа для шести пунктов мониторинга. Для сибирских и дальневосточных станций продолжительность траекторий показанных на рисунке, составляет трое суток, а для европейских и уральской станций – двое суток. На рис. 2.4 показаны обратные траектории только для пункта Уссурийск, но с длительностью семь дней.

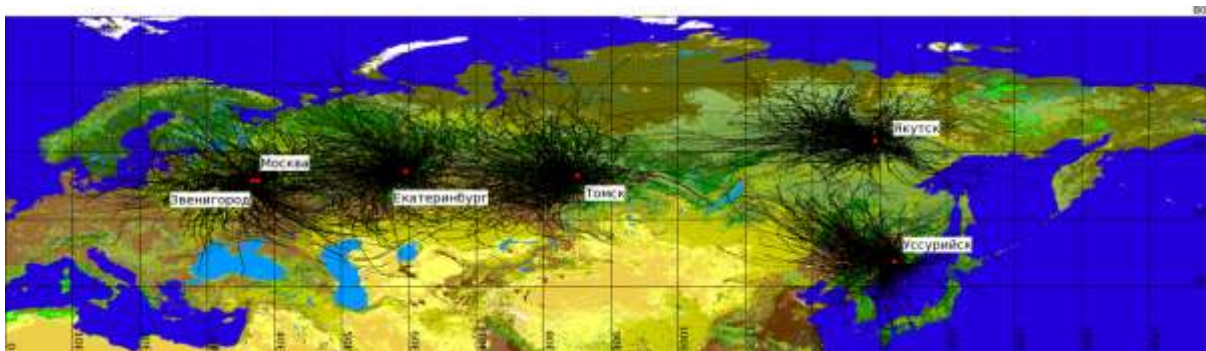


Рис. 2.3. Исходные данные – траектории движения лагранжевых частиц за 2010 г. на изобарической поверхности 950 гПа для каждой из шести станций мониторинга

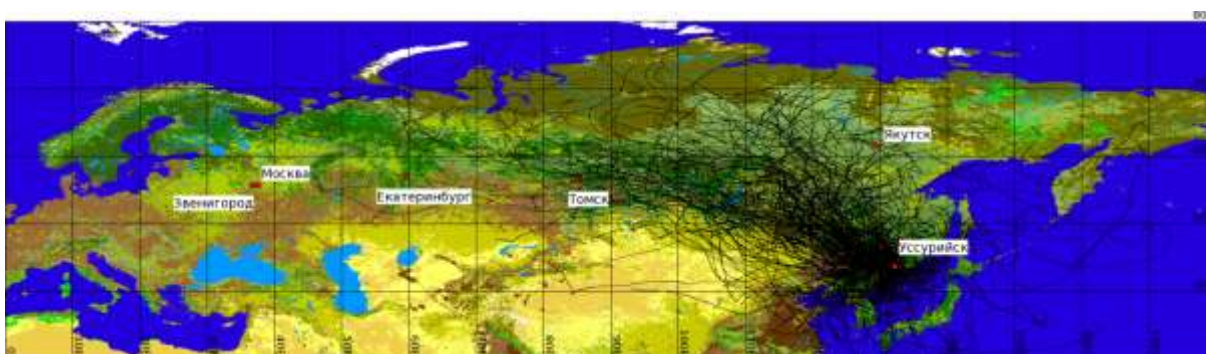


Рис. 2.4. Исходные данные – семидневные траектории движения лагранжевых частиц за 2010 г. на изобарической поверхности 950 гПа для станции мониторинга Уссурийск

Использование в данной задаче лишь «нижних» траекторий на изобарической поверхности 950 гПа означает, что обсуждаемые далее результаты расчетов представляют квазидвумерные поля распределения концентрации тонкодисперсного аэрозоля в пространстве, т. е. являются лишь приближенной оценкой реальных трехмерных полей.

Численное решение задач восстановления пространственного распределения поля объемной концентрации тонкодисперсного аэрозоля по результатам измерений в российском сегменте сети AERONET проводилось внутри области от 0° до 150° в. д. и от 30° до 70° с. ш. Пространственное разрешение, соответствующее размерам ячеек эйлеровой сетки, для представляемых ниже результатов составило $1^\circ \times 1^\circ$, хотя предварительно выполнялись методические расчеты с другими размерами ячеек. Большинство

операций по графическому представлению данных и геоинформационному анализу выполнялось с использованием ГИС GRASS и QGIS [52]. Поля рассчитанных величин в векторном и растровом представлениях показаны в так называемой географической проекции (цилиндрическая эквидистантная проекция).

2.5 Результаты расчета среднего поля объемной концентрации тонкодисперсного аэрозоля на территории России

Решение задачи оценки среднего поля концентрации тонкодисперсного аэрозоля с совместным использованием данных измерений шести станций охватывает очень большую территорию (0° – 150° в. д., 30° – 70° с. ш.). Поэтому кроме общего представления среднего поля концентрации ниже более подробно рассмотрены два региона: 1) южная часть территории Дальнего Востока, где в результате моделирования зафиксированы области с максимальными значениями концентраций тонкодисперсного аэрозоля; 2) один из центральных регионов зоны моделирования с высокой достоверностью полученных результатов (с высокими значениями числа траекторий на единицу площади) – область $10^{\circ} \times 10^{\circ}$ около станции мониторинга Томск.

На рис. 2.5 приведено среднее поле концентрации тонкодисперсного аэрозоля в зоне моделирования всех станций для трех различных представлений: трехмерный вид, растровая карта, векторная карта изолиний. Все три графические представления среднего поля концентрации получены с использованием интерполяции кубическими сплайнами [52] результатов расчета методом ФЛА для сетки с размерами ячеек $1^{\circ} \times 1^{\circ}$. Трехмерное представление среднего поля (рис. 2.5 а) дано с юго-восточного направления, чтобы было видно расположение всех станций мониторинга. Максимальная нормированная концентрация тонкодисперсного аэрозоля внутри области, на каждую ячейку которой приходится не менее одной траектории (так называемой зоны влияния, подробнее см. § 3.2.3), по результатам моделирования составила 6.5.

Область, представленная различными оттенками серого цвета на рис. 2.5 б,

ограничивает территорию, на которой концентрация тонкодисперсного аэрозоля выше величины 1.2, что соответствует средней концентрации в пункте мониторинга Екатеринбург. Уровень изолинии 1.32 на рис. 2.5 в соответствии с величиной средней концентрации по всем рассмотренным пунктам мониторинга, а изолинии уровня 1.6 – верхнему третьему квартилю множества результатов измерений на всех станциях мониторинга (см. табл. 2.1).

Отметим, что области пространства (главным образом в южной части), свободные от изолиний поля концентрации, не означают низких концентраций аэрозоля (чистой атмосферы). Эти территории лежат вне зоны влияния станций мониторинга, данные с которых использовались при моделировании, с этих территорий в пункты мониторинга не поступило ни одной траектории движения воздушных частиц.

Основные особенности общего среднего поля концентраций заключаются в следующем. Территория с зафиксированными методом ФЛА повышенными уровнями концентраций аэрозоля простирается от северных районов Италии и Центральной Европы до западного побережья Охотского и Японского морей на Дальнем Востоке. Камчатка с ее вулканами в зону влияния на станции мониторинга и соответственно в зону моделирования не попала. При этом северные части Европы, Западной, Восточной Сибири и Дальнего Востока в основном имеют существенно более низкие значения концентрации аэрозоля.

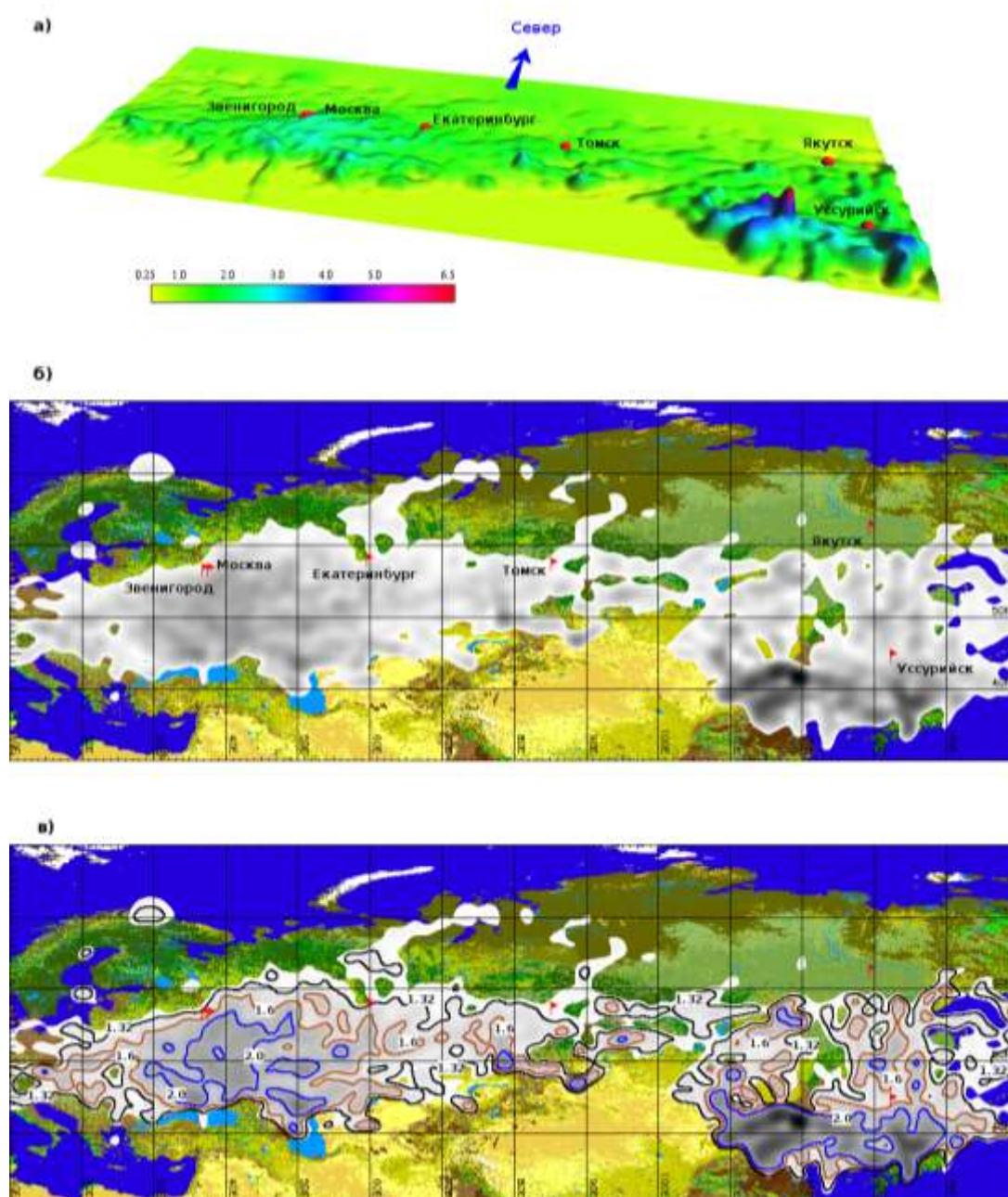


Рис. 2.5. Среднее поле нормированной среднесуточной объемной концентрации тонкодисперсного аэрозоля, полученное методом ФЛА для всей области моделирования

В результате моделирования самые большие концентрации (существенно превышающие максимумы в Сибири и Европе) обнаружены в Китае, северо-восточнее Пекина, а также в районе Японского моря и некоторых из японских островов. Наиболее протяженные по площади области высоких уровней концентрации аэрозоля находятся в Центральной России, южнее и юго-восточнее Москвы. Отдельные пятна высоких значений среднего поля концентрации можно

увидеть в Европе, на Среднем и Южном Урале, на юге Западной Сибири, на Дальнем Востоке.

Более подробно район максимальных уровней концентраций показан на рис. 2.6 в объемном виде и в виде двумерного поля. Из рисунка видно, что области максимальных уровней концентраций можно ассоциировать с индустриальными районами Китая, восточной окраиной пустыни Гоби, с некоторыми районами на Корейском полуострове, акваторией Японского моря и, возможно, отдельными островами. Причиной появления области высокой концентрации аэрозоля в Японском море, по-видимому, является вынос как со стороны юго-востока Китая, так и со стороны Японии (район Осака).

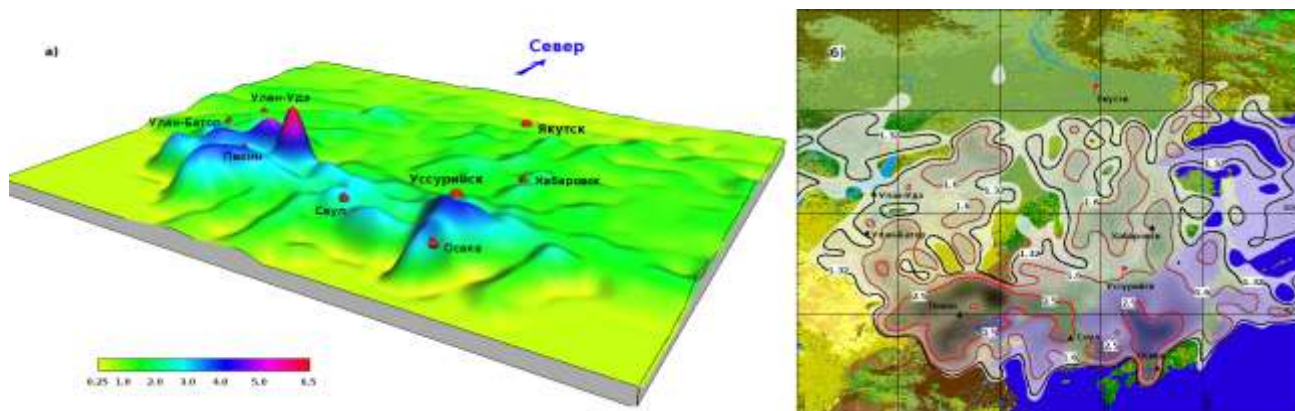


Рис. 2.6. Детализация среднего поля нормированной среднесуточной объемной концентрации тонкодисперсного аэрозоля, рассчитанной методом ФЛА для Дальневосточного региона

В то же время следует обратить внимание, что почти все из указанных территорий лежат внутри области между границей зоны влияния (в данном случае определяемой, прежде всего, по станции Уссурийск) и границей области моделирования (определения понятий «области влияния» и «области моделирования» см. в § 3.2.3). Это означает, что хотя области экстремально высоких уровней концентраций среднего поля аэрозоля на Дальнем Востоке были установлены с помощью метода ФЛА, но достоверность этих данных нельзя считать высокой. В основном эти особенности решения связаны со сравнительно небольшим числом траекторий движения воздуха с высокими значениями концентраций тонкодисперсного аэрозоля, пришедшими в пункт наблюдения в

Уссурийске со стороны пустыни Гоби и отчасти с юго-востока Китая и юга Японии. Для более точной количественной идентификации источников тонкодисперсного аэрозоля необходимо продолжение наблюдений в Уссурийске (для улучшения статистики), привлечение к анализу данных других AERONET станций в этом регионе, а также выполнение расчетов обратных траекторий не два раза в сутки, а для каждого конкретного измерения, сопровождающегося восстановлением функции распределения аэрозоля по размерам.

Ранее отмечалось, что метод ФЛА позволяет определять не только средние поля концентраций аэрозоля, но и средние поля мощностей источников/стоков аэрозоля в атмосфере. Как и следовало ожидать, источники детектируются в основном в тех областях карты, где обнаруживаются высокие уровни среднего поля концентраций. Однако пространственные распределения в этом случае более фрагментированы – обнаруживается много мелких замкнутых полигонов, ограничивающих области, являющиеся источниками аэрозоля. Много слабых источников обнаруживается и в тех областях, где среднее поле концентраций имеет сравнительно невысокие значения (в основном северная часть зоны моделирования). В связи с большим периодом усреднения, использованным в данной работе, много временных источников аэрозоля (вероятно, это лесные, торфяные пожары) имеют очень слабо выраженный на карте сигнал. Хотя такие источники и были зафиксированы в зоне лесов, тайги, степей, но по мере обработки траекторий, проходящих через эти же области в отсутствие действия данных временных источников, вклад их в общий сигнал существенно снижался.

Основные результаты главы 2

1. Представлено подробное описание и классификация существующих методов статистики обратных траекторий (COT), которые позволяют проводить анализ пространственной структуры загрязнения атмосферы примесью. Основным недостатком классических методов COT является принципиальная невозможность учета физических и химических трансформаций, происходящих с примесью в процессе переноса в атмосфере.

2. Представлено описание нового метода совместного анализа результатов измерений концентраций примеси и информации о динамике атмосферы в виде обратных траекторий – метода флюид-локации атмосферы (ФЛА). В основе метода ФЛА лежит итерационное решение уравнения сохранения примеси в атмосфере в представлениях Эйлера и Лагранжа, что позволяет развить метод в направлении учета реальных физико-химических процессов, которым подвержена примесь в атмосфере.

3. Разработан алгоритм численной реализации метода ФЛА для обработки результатов спектральных фотометрических измерений параметров атмосферного аэрозоля. С помощью проведения большого числа численных экспериментов, были подобраны разностное представление и итерационный алгоритм, обеспечивающие устойчивость расчетной схемы.

4. Методом ФЛА проведена оценка среднего поля объемной концентрации тонкодисперсного аэрозоля на территории России. Исходными данными для моделирования служили результаты измерений аэрозольных характеристик атмосферы на шести станциях мониторинга сети AERONET, расположенных на территории России, за период с 2004 по 2010 г. и семисуточные обратные траектории движения воздушных частиц на высоте 950 гПа.

5. Полученное среднее поле концентраций обладает следующими особенностями: область повышенных значений концентраций тонкодисперсного аэрозоля зафиксирована в средних и южных широтах и вытянута с запада на восток; самые высокие концентрации тонкодисперсной фракции аэрозоля обнаружены в Центральной России, в Китае (северо-восточнее Пекина), а также над Японским морем и некоторыми японскими островами; в северных широтах расчетной области над континентом наблюдаются самые низкие уровни концентраций.

Глава 3 Верификация метода ФЛА

В связи с тем, что в любом из методов СОТ, включая метод ФЛА, ищется не поле усредненной за некоторый заданный период времени концентрации, а вновь заданная функция – среднее эффективное поле концентраций (см. § 2.2), то исключительно важной становится задача верификации соответствующего метода и результатов, полученных с его помощью.

3.1 Общая постановка задачи верификации метода ФЛА

Для верификации метода ФЛА в общем случае необходимо оценить:

- распределение погрешностей статистической оценки среднего эффективного поля концентрации;
- насколько точно восстанавливаются значения концентраций примеси в фиксированных контрольных рецепторных точках, т. е. насколько рассчитанное среднее эффективное поле концентрации отличается от средней измеренной концентрации в точке размещения независимого контрольного прибора;
- насколько структура пространственного распределения найденных функций (в данной работе – среднее эффективное поле концентрации) соответствует структуре пространственного распределения поля средней концентрации;
- насколько правильно определяется местоположение источников и мощности эмиссии загрязняющих веществ в атмосферу.

В данной работе выполнено несколько тестов-проверок результатов решения задач восстановления среднего эффективного поля тонкодисперсного аэрозоля методом ФЛА в квазидвумерном приближении. Подробное описание физико-математических основ и алгоритма численных расчетов метода ФЛА представлено в главе 2. В качестве исходных данных использовались объемные концентрации тонкодисперсного (частицы с радиусом от 0.05 до 0.76 мкм) аэрозоля в столбе атмосферы, восстановленные из результатов спектральных фотометрических измерений за период 2004–2010 гг. в шести пунктах аэрозольно-

оптического мониторинга глобальной сети AERONET (URL: <http://aeronet.gsfc.nasa.gov/>), расположенных на территории России: Звенигород, Москва, Екатеринбург, Томск, Якутск, Уссурийск [63, 64]. Использовались данные уровня 1.5 по классификации AERONET, что обеспечило учет различных состояний атмосферы как с высокими (аэрозольная оптическая толщина на длине волны 0.44 мкм больше 0.4), так и с низкими уровнями замутненности. Поскольку реальное распределение аэрозоля по высоте не известно и невозможно установить долю аэрозоля, расположенного в слое моделирования (см. ниже), то для удобства анализа все концентрации нормированы на характерное значение объемной концентрации тонкодисперсного аэрозоля, в качестве которого выбрано медианное значение выборки результатов наблюдений в пункте мониторинга Екатеринбург за период 2004–2010 гг., равное $0.025 \text{ мкм}^3/\text{мкм}^2$.

При решении задачи восстановления пространственного распределения тонкодисперсного аэрозоля для учета динамических процессов в атмосфере использовались семисуточные обратные траектории воздушных частиц, начинающиеся в перечисленных выше пунктах мониторинга на изобарической поверхности 950 гПа, рассчитанные Т. Кучерой и представленные на сайте НАСА (URL: <http://croc.gsfc.nasa.gov/aeronet/>). Высота старта обратных траекторий составляет около 500 м, т. е. лежит внутри пограничного слоя атмосферы. Как показано в экспериментальных исследованиях [65, 66], объемная концентрация аэрозоля в этом слое атмосферы максимальна, что является следствием того, что в анализируемом регионе основные источники аэрозоля антропогенного и природного происхождения расположены в приземном слое атмосферы. В то же время при анализе представленных ниже результатов следует помнить об ограниченности такого квазидвумерного подхода, который не учитывает реальное распределение аэрозоля по высоте и изменение модуля и направления скорости ветра с высотой.

Период моделирования методом ФЛА, за который проводилось усреднение, составил семь лет, с 2004 по 2010 г., для всех станций мониторинга, кроме Звенигорода. Период моделирования для станции мониторинга Звенигород

начинается с 2006 г. Задача одновременной обработки данных измерений всех указанных пунктов мониторинга решается в области пространства от 30° до 70° с. ш. и от 0° до 150° в. д. Вся расчетная область разбивается на ячейки с размерами $1^\circ \times 1^\circ$.

В ходе моделирования методом ФЛА рассчитывалось [67, 68] пространственное распределение следующей величины:

$$\bar{C}_{ij} \stackrel{\text{def}}{=} \frac{1}{T_{ij}} \left(\sum_l \int C_l dt \right)_{ij} \approx \left(\frac{1}{\sum_l \tau_l} \sum_l \sum_{k_l} C_{k_l} \Delta t_{k_l} \right)_{ij}, \quad (3.1)$$

где $\bar{C}_{ij}$ – среднее эффективное поле нормированной концентрации тонкодисперсного аэрозоля, индексы i, j идентифицируют эйлерову ячейку пространства (решается квазидвухмерная задача);

T_{ij} – полное время нахождения всех воздушных частиц (лагранжевых частиц) в объеме эйлеровой ячейки (i, j) ;

C_l – концентрация примеси, изменяющаяся вдоль траектории с номером l , а суммирование по l означает суммирование (перебор) по всем траекториям движения лагранжевых частиц, проходящих через анализируемую эйлерову ячейку пространства;

t – время, переменная интегрирования вдоль траекторий движения лагранжевых частиц; интегрирование выполняется по отрезку времени, в течение которого лагранжева частица l находится внутри соответствующей эйлеровой ячейки (i, j) ;

τ_l – время нахождения l -й лагранжевой частицы в объеме эйлеровой ячейки (i, j) ;

k_l – номер точки k на траектории l внутри соответствующей эйлеровой ячейки i, j , а суммирование по k_l означает суммирование по всем точкам траектории l внутри анализируемой эйлеровой ячейки;

Δt_{k_l} – шаг по времени между соседними точками на траектории l (при расчете траекторий был принят постоянным и равен 15 минутам).

Следует еще раз подчеркнуть, что в методе ФЛА значения концентрации примеси изменяются вдоль траектории, в то время как в традиционных методах СОТ (исключая метод А. Штоля) они остаются постоянными и равными значению концентрации в момент измерения. Это означает, что в формуле (3.1) величина C_l , или в разностной форме C_{kl} , есть неизвестная функция, которая находится в результате решения задачи методом ФЛА.

Согласно методу ФЛА [67] одновременно со средним эффективным полем концентрации примеси рассчитывается среднее эффективное поле источников/стоков примеси. Однако в настоящей работе верифицируется только расчет концентраций, т. к. для контроля местоположений и мощностей эмиссии примеси (аэрозоля) в атмосферу необходимы другие подходы, что составляет тему отдельного исследования. Поэтому далее среднее эффективное поле источников/стоков примеси в атмосферу не обсуждается, хотя следует заметить, что эта функция и является неотъемлемой и важной частью решения задачи методом ФЛА.

3.2 Расчет погрешностей статистической оценки поля средних концентраций

Как отмечалось выше, одним из результатов использования метода ФЛА является величина среднего эффективного поля концентрации, определение которой дает формула (3.1). К возникновению погрешностей при оценке средних значений концентраций приводит переход в формуле (3.1) от интеграла по времени к расчету конечной суммы. В то время как интеграл в левой части формулы (3.1) является точным определением средней величины концентрации, учитывающим все лагранжевы частицы в расчетной ячейке пространства, то конечная сумма в правой части (которая используется при выполнении приближенных численных расчетов) учитывает при оценке средней величины только конечное число лагранжевых частиц – обратных траекторий, пришедших в расчетную ячейку от конечного числа точек, где выполнялись измерения. Это означает следующее. Во-первых, левая (определение среднего) и правая

(приближенная расчетная формула) части формулы (3.1) соотносятся как среднее по генеральной совокупности и среднее, рассчитанное по выборке конечных размеров. Во-вторых, в силу разной плотности числа обратных траекторий в различных областях пространства погрешности расчета среднего по формуле (3.1) будут различными. По мере удаления от пунктов мониторинга, т. е. точек старта траекторий, плотность числа обратных траекторий уменьшается, а погрешности расчета средних величин возрастают. Именно погрешности, обусловленные различным числом траекторий движения воздушных частиц в различных расчетных ячейках, будут рассмотрены далее.

Рассмотрим некоторую ячейку (i,j) пространства, через которую проходило N траекторий, в каждой точке которых концентрации известны (или оценены). Чтобы проводить содержательный статистический анализ, выборка концентраций в ячейке должна содержать независимые значения. Так как значения концентраций вдоль одной траектории нельзя считать независимыми, определяются средние значения концентраций $(\bar{C}_l)_{ij}$ на каждой отдельной траектории l в ячейке (i,j) :

$$(\bar{C}_l)_{ij} = \frac{1}{n_{ijl}} \sum_{k_l=1}^{n_{ijl}} C_{k_l}, \quad (3.2)$$

где n_{ijl} – число точек траектории l внутри ячейки (i,j) ;

C_{k_l} – значение концентрации аэрозоля в точке k траектории l .

Далее предположим, что множество средних за небольшой интервал времени значений концентраций примеси в каждой точке пространства подчиняется логнормальному закону распределения. Это допущение физически вполне оправдано. Усреднение вдоль траектории лагранжевой частицы, проходящей через заданную неподвижную точку пространства, эквивалентно усреднению концентраций в этой точке за промежуток времени прохождения через нее соответствующего отрезка траектории лагранжевой частицы. Статистический анализ результатов измерений, усредненных за час, выполненный с использованием критерия, Пирсона показывает, что на уровне значимости 0.05

логарифмы объемных концентраций тонкодисперсной фракции аэрозоля в точке проведения измерений (в Екатеринбурге) подчиняются нормальному закону распределения. Аналогичный анализ проводился и в других пунктах мониторинга атмосферного аэрозоля (см., например, [68]). Это означает, что предположение о логнормальном законе распределения концентраций статистически оправдано.

3.2.1 Задача оценки медиан концентраций

Для оценки доверительных интервалов математического ожидания логарифмов концентраций, т. е. преобразованной выборки [69], воспользуемся законом распределения Стьюдента:

$$\mu_{Ln}^* - \varepsilon_{Ln} < \mu_{Ln} < \mu_{Ln}^* + \varepsilon_{Ln}$$

$$\mu_{Ln}^* = \frac{1}{N} \sum_{l=1}^N \ln \bar{C}_l, \quad \varepsilon_{Ln} = t_\gamma \frac{s_{Ln}^*}{\sqrt{N}}, \quad s_{Ln}^* = \left(\frac{1}{N-1} \sum_{l=1}^N (\ln \bar{C}_l - \mu_{Ln}^*)^2 \right)^{1/2}, \quad (3.3)$$

где μ_{Ln} – математическое ожидание логарифмов концентраций;

μ_{Ln}^* – выборочная оценка средней величины логарифмов концентраций;

ε_{Ln} – доверительные границы для преобразованной выборки;

t_γ – значение функции распределения Стьюдента, которое зависит от доверительной вероятности (в данной работе принято $\gamma = 0.9$) и объема выборки N ;

s_{Ln}^* – исправленная выборочная оценка среднеквадратичного отклонения логарифмов концентраций.

Обратный переход от логарифмов к концентрациям в формуле (3.3) приводит к следующей оценке:

$$\frac{e^{\mu_{Ln}^*}}{e^{\varepsilon_{Ln}}} < e^{\mu_{Ln}} < e^{\mu_{Ln}^*} \cdot e^{\varepsilon_{Ln}} \quad (3.4)$$

Учитывая определение среднего геометрического C_g и известное выражение для медианы логнормального распределения $Me = e^{\mu_{Ln}}$ [70], получаем

следующее выражение для оценки точности определения медианного значения исходных концентраций в расчетной ячейке:

$$\frac{\bar{C}_g}{e^{\varepsilon_{Ln}}} < Me < \bar{C}_g \cdot e^{\varepsilon_{Ln}} \text{ или } e^{-\varepsilon_{Ln}} < \frac{Me}{\bar{C}_g} < e^{\varepsilon_{Ln}}, \quad (3.5)$$

где $\bar{C}_g = \sqrt[N]{\prod_{l=1}^N (\bar{C}_l)_{ij}}$ – среднее геометрическое значение концентраций в ячейке (i,j) .

Неравенства (3.5) позволяют в каждой расчетной ячейке оценить погрешности определения *медианы* среднего эффективного поля концентрации примеси методом ФЛА, связанные с использованием усреднения по формуле (3.1). Аналогичные, но более сложные оценки можно получить для других моментов функции распределения.

3.2.2 Задача оценки средних концентраций

Оценка погрешностей *среднего арифметического* значения концентраций в ячейке пространства производится с помощью построения двустороннего 90% доверительного интервала для математического ожидания [71]:

$$\bar{C}_l - Z_{0.95} \frac{s^*}{\sqrt{N}} < \mu < \bar{C}_l + Z_{0.95} \frac{s^*}{\sqrt{N}}, \quad (3.6)$$

где $Z_{0.95} \approx 1.6$ – 95%-квантиль стандартного нормального распределения $N(0,1)$;

μ – математическое ожидание средних по траекториям концентраций;

s^* – исправленная выборочная оценка среднеквадратичного отклонения средних по траекториям концентраций.

Выражение (3.6) справедливо только для выборок большого размера $N > 100$ [72]. В рассматриваемой задаче это условие соответствует случаю, когда через расчетную ячейку пространства проходит больше 100 траекторий. В случае небольшой выборки логнормально распределенных концентраций для оценки двустороннего 90% доверительного интервала математического ожидания используется формула [72, 73]:

$$\exp\left(\mu_{Ln}^* + 0.5s_{Ln}^{*2} + \frac{s_{Ln}^* H_{0.95}}{\sqrt{N-1}}\right) < \mu < \exp\left(\mu_{Ln}^* + 0.5s_{Ln}^{*2} + \frac{s_{Ln}^* H_{0.05}}{\sqrt{N-1}}\right) \quad (3.7)$$

$$\mu_{Ln}^* = \frac{1}{N} \sum_{l=1}^N \ln \bar{C}_l, \quad s_{Ln}^* = \left(\frac{1}{N-1} \sum_{l=1}^N (\ln \bar{C}_l - \mu_{Ln}^*)^2 \right)^{1/2},$$

где μ_{Ln}^* – выборочная оценка средней величины логарифмов концентраций;

s_{Ln}^* – исправленная выборочная оценка среднеквадратичного отклонения логарифмов концентраций;

$H_{0.95}$ и $H_{0.05}$ – табулированные величины [72] (см. табл. А. 1, А. 2), которые зависят от s_{Ln}^* и N .

3.2.3 Задача определения зон влияния, моделирования, контроля

В работе [74] было введено понятие *зоны влияния* на измерительный прибор. Зона влияния – это область пространства, где какое-либо событие, связанное с загрязнением атмосферы, потенциально может быть зарегистрировано в точке размещения прибора через указанное время. На практике зона влияния на прибор определяется как выпуклый многоугольник (в двухмерном случае), содержащий все множество обратных траекторий движения воздушных частиц указанной продолжительности (от 1 до 7 суток), рассчитанных за анализируемый период времени (рис. 3.1).

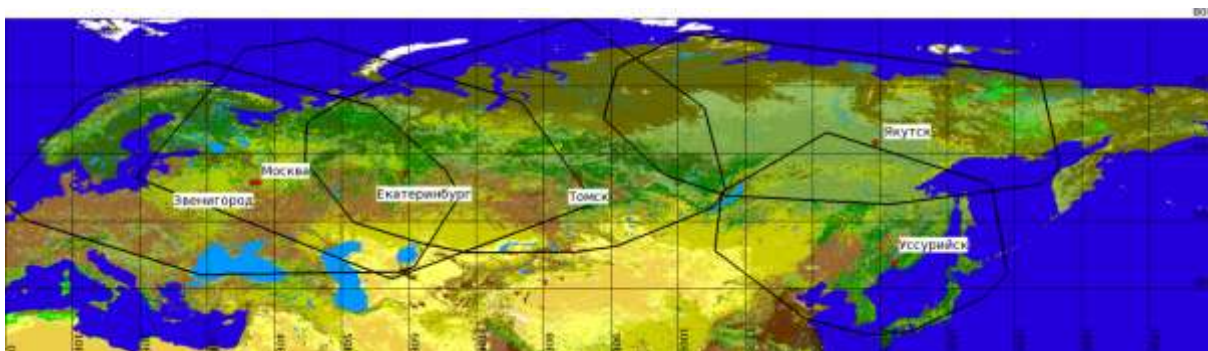


Рис. 3.1. Зоны влияния (за трое суток) для шести станций мониторинга за период 2004–2010 гг.

Исходя из определения зоны влияния, другой способ обозначить ее заключается в нахождении области пространства, ограниченной изолинией поля плотности числа траекторий со значением, равным единице, т. е. с территорий вне

этой области за рассматриваемый период времени в пункты мониторинга не пришло ни одной траектории движения воздушных потоков. На рис. 3.2 показана общая зона влияния шести пунктов мониторинга сети AERONET, расположенных на территории России за период с 2004 по 2010 г.: серым цветом закрашена область, не попавшая в общую зону влияния, т. е. ограниченная изолинией $n_{tr}=1$.

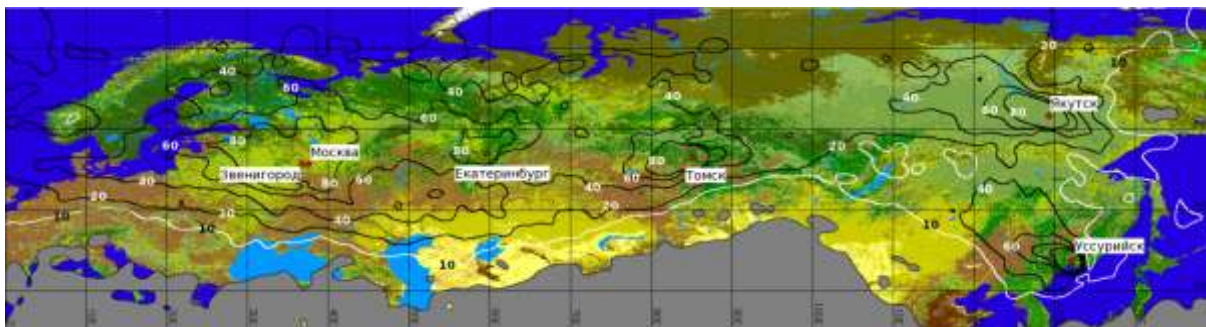


Рис. 3.2. Поле распределения плотности числа обратных семисуточных траекторий: $n_{tr}=1$ – зона влияния для всех шести пунктов мониторинга; $n_{tr}=10, 20, 40, 60, 80$ – изолинии, разделяющие области различной достоверности результатов расчетов

Как отмечалось ранее, при анализе результатов моделирования методом ФЛА и другими методами СОТ следует учитывать, что внутри зон влияния существуют области с различной плотностью числа траекторий на единицу площади. Области пространства, в которых плотность числа траекторий достаточно велика и позволяет выполнять содержательный анализ получаемых средних полей концентраций, рассматриваются далее как *зоны моделирования*. В области пространства внутри зоны влияния, но вне области моделирования, результаты расчетов методом ФЛА следует считать малодостоверными. В настоящей работе зона моделирования определяется как область пространства, в которой относительная погрешность определения среднего значения концентрации, найденная с помощью формул (3.5 – 3.7), не превышает 30%.

Области пересечения зон моделирования различных станций мониторинга далее называются *зонами контроля*, поскольку в таких областях пространства можно проводить сравнение результатов модельных расчетов полей концентраций, восстановленных по независимым рядам измерений, выполненным на таких станциях.

3.2.4 Результаты определения погрешностей статистических оценок средних полей концентраций

На рис. 3.3 а показано поле распределения плотности числа обратных семисуточных траекторий движения воздушных частиц за период с 2004 по 2010 г. для шести станция мониторинга сети AERONET на территории России. Область пространства, обозначенная двойной штриховкой, соответствует территории, не попавшей в общую зону влияния, или, другими словами, территории, с которой в пункты мониторинга не пришло ни одной траектории движения воздушных частиц за весь период измерений (2004–2010 гг.). Знаком «звездочка» указаны пункты мониторинга AERONET, результаты измерений которых использованы для обработки методом ФЛА (слева направо: Звенигород, Москва, Екатеринбург, Томск, Якутск, Уссурийск). На рис. 3.3 б показаны области, в которых относительная погрешность оценки медианы концентрации аэрозоля, рассчитанная с помощью формулы (3.5), не превышает 10, 20 и 30%. Двойной штриховкой выделена область пространства, в которой плотность числа траекторий на расчетную ячейку $n_{tr} \leq 3$. Так же, как и на рис. 3.3 а, жирной обозначена изолиния, территории внутри которой характеризуются плотностью траекторий на расчетную ячейку $n_{tr} \geq 10$. Из рис. 3.3 б видно, что изолиния, соответствующая числу траекторий на расчетную ячейку $n_{tr} = 10$, хорошо описывает область пространства, в которой относительная погрешность определения медианного значения концентрации аэрозоля не превышает 30%.

На рис. 3.3 в показано пространственное распределение относительных погрешностей средних концентраций, рассчитанных по формулам (3.6) и (3.7). Жирной пунктирной обозначена изолиния, определяющая территории с плотностью траекторий на расчетную ячейку $n_{tr} \geq 20$. Эта изолиния лучше описывает область пространства, в которой относительные погрешности определения средних концентраций менее 30%.

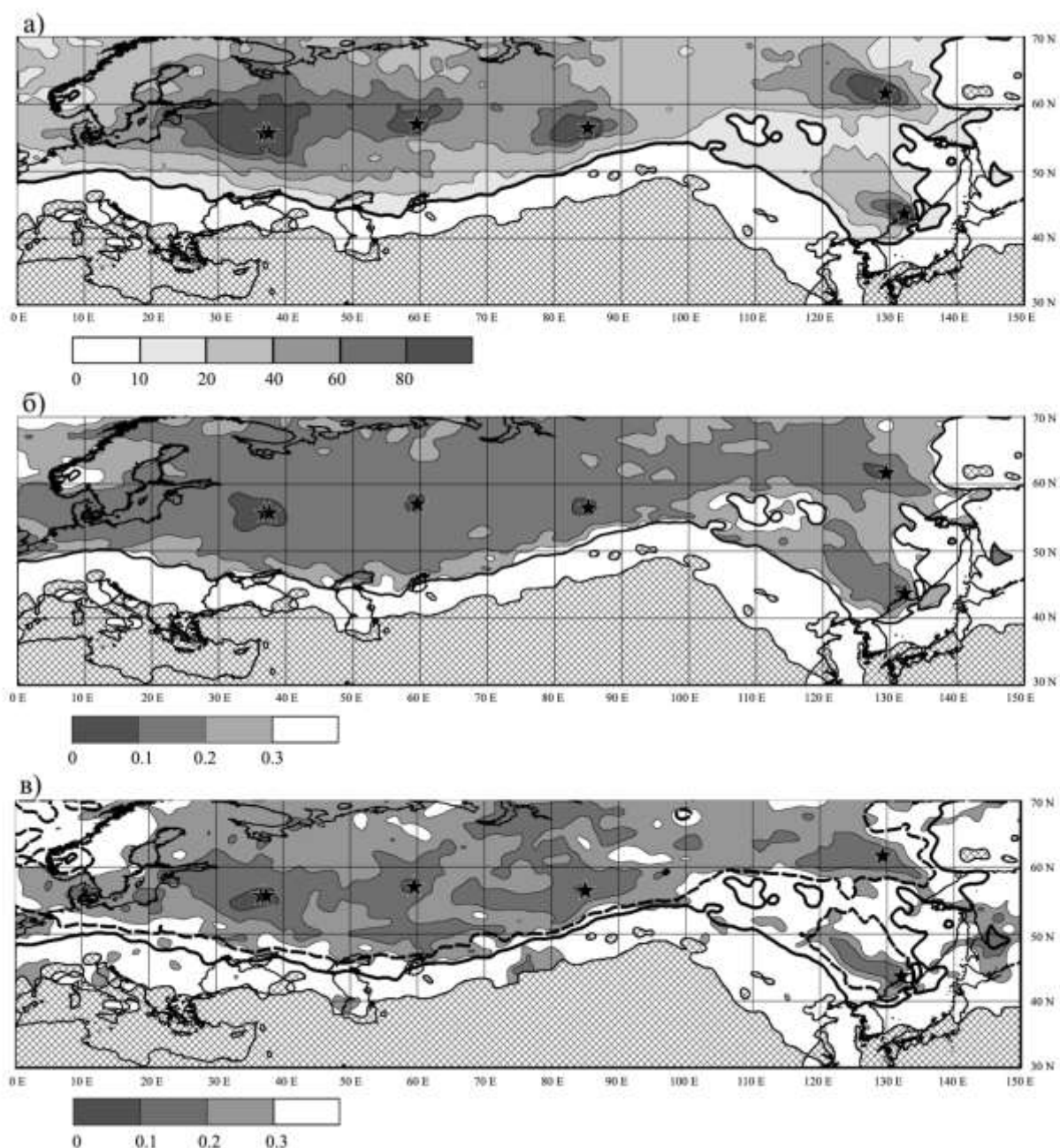


Рис. 3.3. Область моделирования: а) пространственное распределение плотности числа обратных траекторий; б) пространственное распределение относительных погрешностей медианы концентрации, рассчитанных по формуле (3.5); в) пространственное распределение относительных погрешностей средних концентраций, рассчитанных по формулам (3.6), (3.7)

Особенностью рассчитанных по результатам моделирования пространственных распределений погрешностей определения средних концентраций (средних геометрических на рис. 3.3 б и средних арифметических на рис. 3.3 в) является то, что области пространства с 20% и 30% относительными погрешностями охватывают очень большую часть территории. Таким образом,

использование метода ФЛА для обработки результатов аэрозольных измерений позволяет оценивать поле средних концентраций (путем расчета среднего эффективного поля концентраций) в точках, удаленных от пункта мониторинга на расстояния, превышающие 1000 км. Применение метода ФЛА к анализу данных измерений всего шести пунктов мониторинга позволяет выполнить оценку распределения тонкодисперсного аэрозоля в атмосфере почти над всей территорией страны.

Следует отметить, что приведенные выше оценки погрешностей относятся только к одному из этапов алгоритма расчетов метода ФЛА – операции усреднения при нахождении среднего эффективного поля концентраций (аналогичные операции усреднения используются и в некоторых других методах СОТ). В настоящей работе не обсуждаются и не оцениваются погрешности, возникающие при выполнении других этапов алгоритма: погрешности конечно-разностных аппроксимаций для вычисления мощностей источников/стоков примеси в атмосферу; погрешности численного решения дифференциальных уравнений переноса примеси вдоль траекторий движения воздушных частиц; погрешности вычисления самих траекторий движения лагранжевых частиц и др. (влияние на результат моделирования погрешностей измерений или восстановления (с помощью решения обратных задач) самих концентраций аэрозоля в пунктах мониторинга; погрешности измерений, необходимых для расчета метеорологических параметров, и погрешности их интерполяции на расчетную сетку; погрешности численной реализации итерационной процедуры метода ФЛА; погрешности квазидвумерного приближения; погрешности, возникающие из-за неучета важных физических и химических процессов, происходящих с примесью в атмосфере). Информацию об общей результирующей степени достоверности получаемых с помощью метода ФЛА результатов и их общих погрешностях может дать сравнение результатов моделирования с данными независимых измерений, представленное ниже.

3.3 Способы верификации метода ФЛА

В общем случае для верификации метода ФЛА в задаче определения пространственной структуры поля загрязнения атмосферы можно использовать следующие способы.

1. Сравнение результатов расчетов методом ФЛА среднего эффективного поля концентрации в контрольных точках с усредненными по времени концентрациями примеси, измеренными в этих точках с помощью независимых приборов.
2. Сравнение пространственных распределений средних эффективных полей концентраций, рассчитанных методом ФЛА на основе данных измерений независимых приборов.
3. Сопоставление расчетного среднего эффективного поля концентраций тонкодисперсного аэрозоля с информацией о размещении в пространстве известных источников загрязнения.
4. Сравнение решения задачи методом ФЛА и численного решения прямой задачи рассеяния примеси в атмосфере при заданных параметрах источников примеси.
5. Сравнение пространственного распределения среднего эффективного поля концентраций, полученного методом ФЛА, с результатами измерений пространственного распределения тонкодисперсного аэрозоля, полученного на основе измерений аэрозольной оптической толщи (АОТ) со спутниковых платформ.

Далее будут более подробно рассмотрены некоторые из перечисленных способов.

3.3.1 Сравнение результатов моделирования с измерениями в контрольных точках мониторинга

Метод ФЛА позволяет на основе измерений даже в одной отдельной точке восстанавливать пространственную структуру концентраций примеси в атмосфере. Поэтому, если в зону моделирования, сформированную по

результатам измерений в некоторой точке аэрозольных наблюдений, попадает хоть один другой независимый пункт мониторинга, то появляется возможность сравнить результаты моделирования и измерений. В российском сегменте сети AERONET зоны моделирования Томска, Москвы, Звенигорода содержат станции мониторинга Екатеринбург, Звенигород и Москва соответственно. В табл. 3.1 показаны результаты решения трех отдельных задач восстановления среднего эффективного поля концентрации по данным измерений в Томске, Москве и Звенигороде. Представлено сравнение результатов моделирования методом ФЛА со средними объемными концентрациями тонкодисперсного аэрозоля, измеренными непосредственно в пунктах контроля. Следует отметить, что анализируются косвенные измерения, т. к. функция распределения частиц по размерам, и концентрация тонкодисперсного аэрозоля восстановлены по данным спектральных измерений с помощью решения соответствующих обратных задач.

Для сравнения результатов моделирования с измерениями в Москве и Звенигороде ряды концентраций в этих пунктах мониторинга были выровнены по срокам выполнения измерений. Это потребовалось, т. к. периоды проведения замеров объемных концентраций аэрозоля для Москвы и Звенигорода существенно различаются (для Звенигорода данные о концентрациях аэрозоля доступны с 2006 г., в то время как в Москве такие измерения проводятся с 2004 г.).

Таблица 3.1. Сравнение нормированных средних объемных концентраций аэрозоля, рассчитанных методом ФЛА, с данными измерений

Пункт мониторинга	Результаты расчета/ (исходные данные)	Измерения
Екатеринбург	1.6/ (по данным Томска)	1.4
Звенигород	1.5/ (по данным Москвы)	1.7
Москва	2.0/ (по данным Звенигорода)	1.7

Из приведенной таблицы видно, что расчет концентраций аэрозоля в пункте мониторинга Екатеринбург по данным измерений в Томске завышает результат на 14%; концентрация в пункте размещения прибора в Звенигороде по данным мониторинга в Москве занижается на 12%; моделирование среднего поля концентраций на основе данных станции Звенигород для Москвы завышает результат на 18% по сравнению с прямыми измерениями в Москве.

Таким образом, прямые измерения объемных концентраций аэрозоля и результаты моделирования на основе наблюдений в удаленной точке отличаются менее чем на 20%, что говорит о хорошем соответствии рассчитанных с помощью метода ФЛА концентраций аэрозоля реально наблюдаемым. Из этих результатов следует, что величина среднего эффективного поля концентрации, рассчитанная с помощью усреднения вида (3.1), при достаточном количестве измерений и обратных траекторий является хорошим приближением к средней концентрации примеси.

3.3.2 Сравнение пространственных распределений полей в контрольных зонах

Как отмечалось выше, зоны моделирования двух станций мониторинга могут формировать зону контроля. В зоне контроля по результатам решения двух задач обработки данных независимых пунктов мониторинга методом ФЛА имеется два поля концентраций. В настоящей работе сравнение пространственных полей в зоне контроля выполнено путем сопоставления основных статистических характеристик двух полей распределений концентраций, а также с помощью анализа статистических характеристик «поля различий» (т. е. «поля различий» между средними эффективными полями концентраций в каждой расчетной ячейке) (табл. 3.2).

Таблица 3.2. Некоторые статистические характеристики средних эффективных полей нормированных концентраций тонкодисперсного аэрозоля и полей различий (выделены шрифтом) для четырех зон контроля

Пункт мониторинга	1-й квартиль	среднее	медиана	3-й квартиль	Стандартное отклонение
Звенигород	0.96	1.41	1.14	1.67	0.64
Москва	1.08	1.39	1.23	1.70	0.43
Москва-Звенигород	-0.15	-0.02	0.05	0.20	0.34
Екатеринбург	1.00	1.13	1.11	1.26	0.18
Томск	1.00	1.14	1.10	1.26	0.20
Екатеринбург-Томск	-0.17	-0.01	-0.02	0.13	0.20
Москва	1.10	1.44	1.37	1.70	0.43
Екатеринбург	0.98	1.13	1.11	1.27	0.20
Москва-Екатеринбург	0.06	0.31	0.25	0.49	0.34
Москва	1.23	1.46	1.48	1.66	0.33
Томск	0.98	1.10	1.06	1.17	0.18
Москва-Томск	0.17	0.37	0.37	0.55	0.27

Очевидно, что чем лучше средние поля концентраций, рассчитанные по независимым измерениям, согласуются между собой, тем ближе должны быть значения соответствующих статистических параметров для каждой пары станций мониторинга. Чем точнее пространственное распределение среднего поля концентраций одной станции соответствует пространственному распределению средних полей концентраций парной анализируемой станции, тем ближе к нулю должен быть любой статистический параметр для поля различий. Например, при сравнении медиан в табл. 3.2 видно, что средние эффективные поля концентраций, полученные методом ФЛА при обработке данных независимых измерений станций Москва–Звенигород и Екатеринбург–Томск, хорошо согласуются между собой как в целом, так и при поточечном сравнении. Абсолютные значения медиан поля различий для этих зон контроля очень близки к нулевым значениям и равны 0.05 и 0.02 соответственно. Кроме того, не только медианы, но и другие статистические параметры средних полей хорошо согласуются, а для Екатеринбурга и Томска практически совпадают в своей контрольной зоне.

Другой способ сравнения двух полей концентраций заключается в визуальном анализе полученных результатов. На рис. 3.4 показано графическое представление результатов моделирования средних эффективных полей объемных концентраций тонкодисперсного аэрозоля методом ФЛА для контрольной зоны Москва–Звенигород по результатам измерений в Москве (а) и Звенигороде (б). Области, не попавшие в зону контроля, обозначены двойной штриховкой. Так как периоды измерения объемных концентраций в данных точках мониторинга существенно различаются, в анализе использовались только данные, соответствующие случаям, когда измерения проводились на обеих станциях.

Видно, что полученные средние эффективные поля концентраций хорошо согласуются между собой качественно и количественно: в северной части зоны моделирования уровни концентраций аэрозоля существенно ниже, чем на юге и юго-востоке. Некоторые различия наблюдаются в западной части зоны контроля, где значения концентраций, полученные методом ФЛА по результатам измерений в Москве, несколько завышены относительно концентраций, рассчитанных на основе аэрозольных наблюдений в Звенигороде.

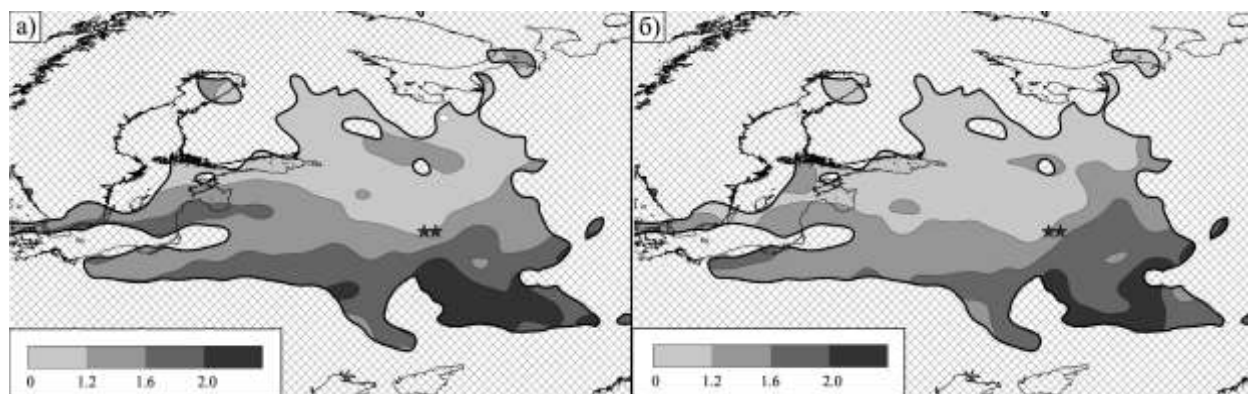


Рис. 3.4. Среднее поле концентрации тонкодисперсного аэрозоля в зоне контроля Москва–Звенигород, рассчитанное: а) по результатам измерений в Москве; б) по результатам измерений в Звенигороде

Средние эффективные поля концентраций тонкодисперсного аэрозоля, рассчитанные на основе результатов независимых наблюдений, в зонах контроля Москва–Звенигород и Екатеринбург–Томск хорошо согласуются между собой.

По результатам сравнения статистических характеристик полей (табл. 3.2)

видно, что пространственные распределения концентраций в зонах контроля Москва–Екатеринбург и Москва–Томск имеют существенные различия. Вероятной причиной этого является большая удаленность друг от друга пунктов, результаты измерения на которых использовались при моделировании сравниваемых полей концентраций аэрозоля.

3.3.3 Сопоставление рассчитанного эффективного поля концентрации с расположением известных источников загрязнения

Один из способов верификации заключается в сравнении рассчитанного с помощью метода ФЛА среднего эффективного поля концентраций с полем концентраций, восстановленным с использованием дисперсионных моделей переноса загрязняющих веществ в атмосфере при известных параметрах и положении источников загрязнения атмосферы. Для такого подхода требуется детальная инвентаризация источников выбросов, что является трудоемкой задачей, особенно в случае мощных естественных или аварийных промышленных выбросов в атмосферу. В данной работе предлагается упрощенный вариант верификации: визуальное сопоставление максимумов расчетного поля концентраций с расположением известных крупных источников аэрозоля. Для примера на рис. 3.5 показан регион Западной Сибири. Как видно из рисунка, пятна повышенной концентрации тонкодисперсного аэрозоля, обнаруженные методом ФЛА, хорошо согласуются с расположением крупных промышленных центров в Западной Сибири.

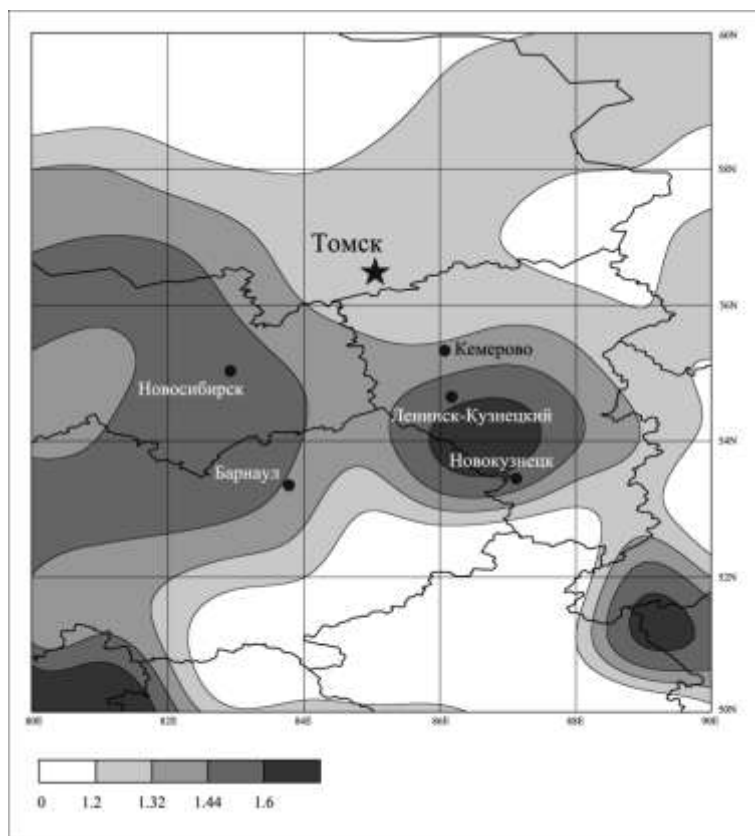


Рис. 3.5. Детализация среднего поля нормированной среднесуточной объемной концентрации тонкодисперсного аэрозоля, рассчитанной методом ФЛА для района Томска

Но, как видно из рис. 3.5, не все максимумы эффективного поля концентраций аэрозоля, рассчитанного методом ФЛА, хорошо согласуются с расположением крупных населенных пунктов.

3.3.4 Верификация метода ФЛА на основе данных спутниковых измерений

Еще один способ верификации метода ФЛА заключается в сопоставлении рассчитанного эффективного поля концентраций аэрозоля со средним полем аэрозольной оптической толщи атмосферы (АОТ), построенным по результатам спутниковых измерений.

На рис. 3.6 а приведено нормированное среднее эффективное поле концентраций тонкодисперсного аэрозоля в столбе воздуха, рассчитанное методом ФЛА. На карту нанесены точки мониторинга российского сегмента сети AERONET, данные с которых использовались при моделировании: Звенигород, Москва, Екатеринбург, Томск, Якутск и Уссурийск. Область пространства, не

попавшая в общую для всех рассматриваемых станций зону моделирования, обозначена двойной штриховкой. На рис. 3.6 б показано среднее поле АОТ атмосферы тонкодисперсной фракции аэрозоля для длины волны 550 нм по спутниковым измерениям (MODIS) за 2004–2010 гг. АОТ определяется степенью ослабления солнечной радиации в результате аэрозольного рассеяния и поглощения, а значит, может рассматриваться в качестве меры содержания аэрозоля в атмосфере.

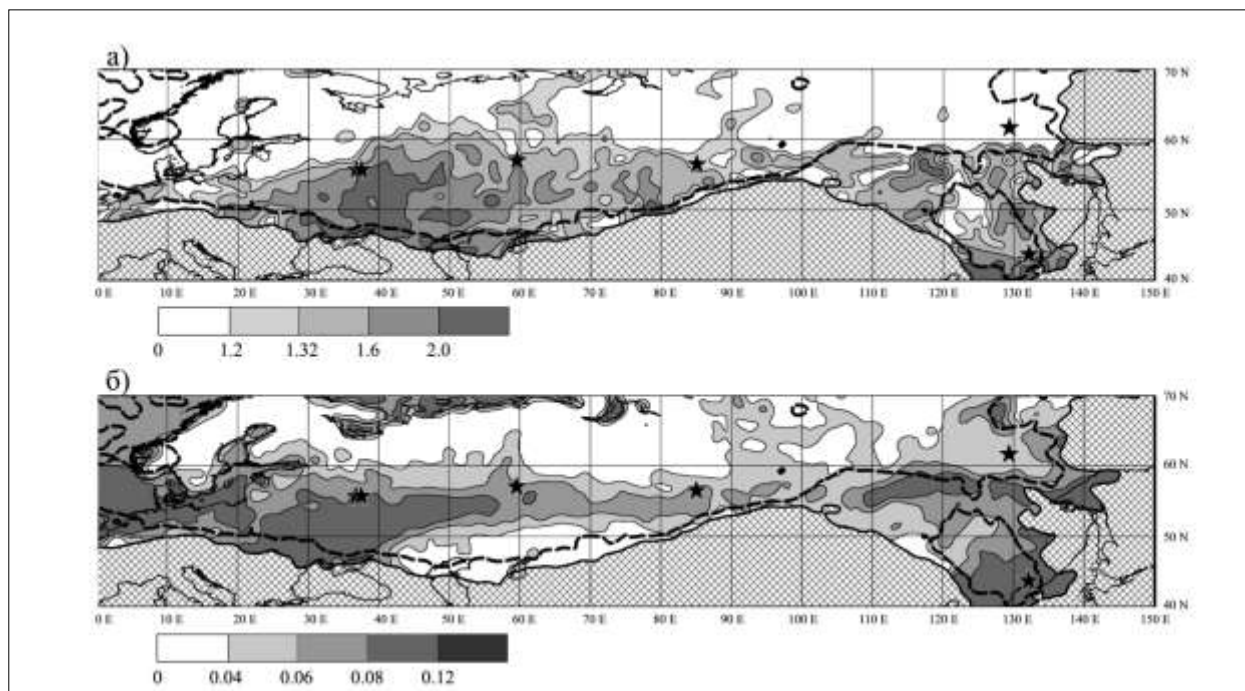


Рис. 3.6. Среднее эффективное поле нормированной объемной концентрации тонкодисперсной фракции аэрозоля, рассчитанное методом ФЛА (а); среднее поле АОТ тонкодисперсной фракции аэрозоля по измерениям MODIS (б)

Из сравнения пространственных распределений средних концентраций и АОТ видны их общие закономерности: северные регионы России имеют значительно меньшие уровни аэрозольного наполнения атмосферы, чем ее центральная и южная части; в Дальневосточном регионе наблюдаются чрезвычайно высокие содержания аэрозоля в атмосфере. Качественно эти выводы согласуются с результатами работ [75, 76].

Кроме того, можно заметить и существенные различия. Например, по данным измерений со спутников, в отличие от результатов моделирования, повышенные уровни АОТ наблюдаются над водными поверхностями. Возможно,

это объясняется тем, что водная поверхность является мощным источником генерации аэрозоля [77], однако использованные при моделировании методом ФЛА данные брались с глубоко континентальных пунктов мониторинга, зоны влияния которых лишь частично лежат над водной поверхностью. Исключением является станция мониторинга Уссурийск, данные с которой позволяют наблюдать повышенные концентрации аэрозоля над Японским морем. Авторы работы [78] также отмечают наличие повышенных уровней АОТ над водными объектами по данным спутниковых измерений, но объясняют эту особенность физическими факторами (например, обводнением континентального аэрозоля) или методическими ошибками дистанционного зондирования аэрозоля из космоса в рассматриваемых областях [78].

Учитывая то, что приведенные на рис. 3.6 поля являются грубыми оценками полей концентраций тонкодисперсного аэрозоля (в настоящей работе обсуждается моделирование квазидвумерного поля, а результаты измерений со спутников имеют ряд своих ограничений), можно сделать вывод об их приемлемом качественном согласии.

Основные результаты главы 3

1. Предложена методика определения погрешностей статистической оценки среднего эффективного поля концентрации, рассчитанного в квазидвумерном приближении метода ФЛА. Оценивались погрешности, обусловленные различной плотностью числа траекторий движения воздушных частиц в различных областях расчетной области. Приведены формулы оценки погрешностей определения медианы и среднего арифметического значения концентраций, восстановленных методом ФЛА в каждой расчетной ячейке.

2. Выполнены расчеты пространственных распределений относительных погрешностей определения среднего эффективного поля концентрации тонкодисперсного аэрозоля при анализе результатов фотометрических измерений шести пунктов российского сегмента сети мониторинга AERONET за период с 2004 по 2010 г.

3. Обсуждаются понятия и определения *зона влияния*, *зона моделирования* и *зона контроля*. Зона моделирования определяется как область пространства, в которой относительная погрешность оценки среднего значения концентрации не превышает 30%. Показано, что в качестве упрощенного практического критерия определения зоны моделирования можно использовать плотность числа траекторий на расчетную ячейку: в случае оценки погрешностей определения медианного значения (среднего геометрического) – $n_{tr} = 10$; для оценки погрешностей среднего арифметического значения – $n_{tr} = 20$.

4. Показано, что области пространства с относительными погрешностями 20% и 30% охватывают обширные территории, что позволяет сделать вывод о возможности использования метода ФЛА для проведения обоснованных оценок полей концентраций примеси в атмосфере на расстояниях, превышающих 1000 км от пунктов мониторинга.

5. Представлены результаты верификации метода ФЛА четырьмя способами, включая сравнение среднего расчетного поля концентраций аэрозоля с пространственным распределением АОТ, по данным спутниковых измерений. Несмотря на то, что моделирование поля концентрации методом ФЛА в квазидвумерном приближении имеет ряд ограничений, все рассмотренные способы верификации указывают на возможность использования метода для оценки средних полей концентраций тонкодисперсного аэрозоля.

Глава 4 Восстановление трехмерных средних полей концентраций аэрозоля методом ФЛА

При решении квазидвумерной задачи методом ФЛА был сделан ряд существенных упрощений, основным из которых, безусловно, является учет динамики атмосферы лишь на одном изобарическом уровне. При переходе от решения квазидвумерной задачи методом ФЛА к моделированию трехмерной структуры пространственных полей концентраций атмосферного аэрозоля необходимо выполнить усложнение алгоритма в нескольких направлениях.

1. Учет реальных физико-химических процессов, происходящих с аэрозолем в атмосфере.
2. Использование информации об обратных траекториях движения воздуха на разных высотах и трехмерных полях метеорологических величин.
3. Привлечение информации о распределении аэрозоля по высоте в момент выполнения измерения.
4. Учет неоднородностей рельефа и типов подстилающей поверхности.

4.1 Сухое осаждение частиц на подстилающую поверхность

Сухое осаждение – это процесс перемещения частиц из атмосферы на подстилающую поверхность в отсутствие осадков. Изучением процесса сухого осаждения частиц на подстилающую поверхность, а также разработкой всевозможных моделей этого процесса занимаются на протяжении более чем 30 лет. Несмотря на это, до сих пор не получено универсального алгоритма оценки потока сухого осаждения, что вызвано, с одной стороны, сложностью рассматриваемого процесса, с другой – сложностью верификации получаемых результатов. Хотя экспериментально скорость сухого осаждения определяется в ходе лабораторных и полевых измерений, оба подхода обладают рядом существенных недостатков. Так, несмотря на то, что при лабораторных исследованиях имеется возможность более гибко управлять условиями эксперимента, получаемые в результате скорости осаждения необходимо

экстраполировать на реальные условия. Полевые же эксперименты требуют точного контроля и определения большого числа факторов, влияющих на исход эксперимента, что не всегда возможно [79].

Сложности возникают также при сопоставлении результатов измерений и расчетов скоростей сухого осаждения. Например, размеры одних и тех же частиц, полученные с помощью различных приборов (на основе различных физических принципов), могут существенно различаться [80]. Таким образом, «аэродинамический» размер частиц, который зависит от геометрических размеров, плотности и формы частиц (полученный с помощью импакторов или центробежных сепараторов [81]), или оптический эффективный размер [82], определяемый показателем преломления и формой частиц, могут существенно отличаться от «стоксового» (геометрического) размера. При сопоставлении результатов необходимо знать физические свойства рассматриваемых частиц, которые зачастую остаются неизвестными. Кроме того, в случае гигроскопических частиц в условиях повышенной влажности, или наоборот, частиц, в состав которых входят летучие компоненты, может возникнуть проблема с интерпретацией данных измерений, связанная с неточностью определения размеров частиц, особенно если не рассматривается химический состав аэрозоля.

Зачастую экспериментально найденные скорости осаждения являются функцией неизвестных условий, при которых проводились измерения, и варьируются в широких пределах – до трех порядков по величине [83].

Большинство моделей сухого осаждения разрабатываются для решения конкретной задачи (контроль качества воздуха, радиационных рисков или распространение тяжелых металлов и др.). Некоторые модели применимы только для определенных диапазонов размеров частиц [84, 85]. Другие моделируют скорости сухого осаждения частиц любой фракции, но на определенную подстилающую поверхность: растительный покров [86], хвойный лес [87, 88], любую поверхность растительного происхождения [89].

В настоящей работе для учета процесса сухого осаждения в методе ФЛА

была выбрана наиболее общая модель, применимая для частиц во всем диапазоне размеров и не ограниченная растительными типами подстилающих поверхностей – модель сухого осаждения Занга [90], совмещенная с моделями безразмерных градиентных функций профилей температуры и импульса.

4.1.1 Модель сухого осаждения Занга

В подавляющем большинстве моделей термин «осаждение» подразумевает целый ряд процессов, происходящих с примесью вблизи поверхности, среди которых турбулентное и гравитационное перемещение примеси и оседание частиц на самой поверхности. Собственно оседание частиц представляет собой результат действия нескольких физических процессов. В модели Занга оседание частиц на поверхности учитывает процессы броуновской диффузии, столкновение, захват и отскок частиц от поверхности, а также процесс гигроскопического роста частиц в условиях повышенной влажности.

Обычно вертикальный поток сухого осаждения F_d , $кг/(м^2 \cdot с)$ считается прямо пропорциональным локальной концентрации примеси $C(z_r)$, $кг/м^3$ на некоторой высоте z_r [91], которая зачастую определяется как нижний уровень моделей переноса или формально берется $z_r = 10$ м:

$$F_d = -V_d(z_r)C(z_r), \quad (4.1)$$

где $V_d(z_r)$ – коэффициент пропорциональности между потоком и концентрацией, имеет размерность длины в единицу времени и называется *скорость сухого осаждения*, $м/с$. Знак «минус» подчеркивает, что нисходящий поток является отрицательным, в то время как скорость сухого осаждения считается положительной величиной.

Чтобы выразить скорость сухого осаждения из выражения (4.1), необходимо тщательно изучить взаимосвязи между потоками и градиентами концентраций примеси. На практике V_d удобно определять на основе «резисторного» подхода, согласно которому области (слои), проходимые частицей по направлению к поверхности, описываются с помощью «сопротивлений» ее движению, по

аналогии с электрическим сопротивлением. Поскольку слои горизонтальные, суммарное сопротивление представляется в виде ряда их последовательных сопротивлений [92].

Ниже рассматривается случай сухого осаждения аэрозольных частиц. Так как гравитационное осаждение частиц (особенно крупных, диаметром $d > 1\text{ мкм}$) вносит существенный вклад в процесс осаждения на подстилающую поверхность, в выражение для скорости сухого осаждения входит скорость седиментации. В [93] выводится формула для скорости сухого осаждения в предположении, что поток частиц, обусловленный гравитационным осаждением, действует параллельно с потоком, выраженным в виде ряда сопротивлений:

$$V_d = \frac{1}{R_a + R_b + R_a R_b V_g} + V_g, \quad (4.2)$$

где R_a – аэродинамическое сопротивление, с/м ;

R_b – сопротивление квази-ламинарного подслоя, с/м ;

V_g – скорость гравитационного осаждения частиц, м/с .

Другой подход к выражению скорости сухого осаждения частиц, согласно которому гравитационное осаждение не влияет на перемещение и осаждение частиц на подстилающую поверхность и просто добавляется к рассчитанной с помощью сопротивлений скорости, был предложен в работе [94] и использован в модели Занга [90]:

$$V_d = V_g + \frac{1}{(R_a + R_s)}, \quad (4.3)$$

где R_s – сопротивление поверхности, с/м .

Гравитационное осаждение

Скорость гравитационного осаждения частиц V_g , м/с выводится на основе законов Стокса и Архимеда и рассчитывается по формуле [95]:

$$V_g = \frac{\rho_p d_p^2 g C_c}{18\eta}, \quad (4.4)$$

где ρ_p – плотность частиц, кг/м^3 ;

d_p – диаметр частиц, м;

g – гравитационное ускорение, $м/с^2$;

C_c – поправка Кэнингхема, учитывающая увеличение подвижности частиц, размер которых сравним со средней длиной пробега молекул газа;

η – коэффициент вязкости воздуха, $Па \cdot с$.

Поправка Кэнингхема рассчитывается как [96]:

$$C_c = 1 + \frac{2\lambda}{d_p} (1.257 + 0.4e^{-0.55d_p/\lambda}), \quad (4.5)$$

где λ – длина свободного пробега молекул, которая является функцией температуры, давления и кинематической вязкости воздуха, м.

Аэродинамическое сопротивление

Приземный слой атмосферы – нижний слой, который испытывает прямое непрерывное динамическое (торможение воздуха) и тепловое (неоднородность нагревания) воздействие подстилающей поверхности на воздушные потоки. Данное воздействие порождает турбулентность, а термическая стратификация атмосферы усиливает или подавляет ее [97]. Аэродинамическое сопротивление, которое характеризует эффективность переноса частиц к поверхности за счет турбулентности в приземном слое атмосферы, определяется на основе подобия процессов переноса вещества и импульса (или подобия процессов переноса вещества и энергии). Таким образом, вертикальный турбулентный поток примеси в приземном слое (или так называемом слое постоянного потока) выражается аналогично переносу импульса (энергии) через градиент концентраций (φ) примеси:

$$F_a = K \frac{d\varphi}{dz}, \quad (4.6)$$

где F_a – вертикальный турбулентный поток примеси, постоянный в приземном слое, $кг/(м^2 \cdot с)$.

K – коэффициент турбулентной диффузии, $м^2/с$;

Коэффициенты турбулентной диффузии импульса K_m , $м^2/с$ и энергии K_h , $м^2/с$ выражаются как:

$$K_m = \frac{ku_*z}{\phi_m(\xi)}, \quad (4.7)$$

$$K_h = \frac{ku_*z}{\phi_h(\xi)}, \quad (4.8)$$

где $k = 0.4$ – постоянная Фон Кармана;

u_* – скорость трения, $м/с$;

$\phi_h(\xi)$ – безразмерная градиентная функция температурного профиля;

$\phi_m(\xi)$ – безразмерная градиентная функция профиля импульса;

$\xi = \frac{z}{L}$ – безразмерный параметр стабильности атмосферы;

L – длина Монины-Обухова, $м$.

Интегрируя выражение (4.6) в интервале высот (z_0, z_r) с учетом (4.7) и (4.8), получаем выражение для потока:

$$F_a = (\varphi(z_r) - \varphi(z_0)) \left(\int_{z_0}^{z_r} \frac{\phi(\xi)}{ku_*z} dz \right)^{-1}, \quad (4.9)$$

где $\varphi(z_r), \varphi(z_0)$ – концентрации на высотах z_r и z_0 соответственно, $кг/м^3$;

z_0 – длина шероховатости (характеристика подстилающей поверхности), $м$;

$\phi(\xi)$ – безразмерная градиентная функция $\phi_h(\xi)$ или $\phi_m(\xi)$, в зависимости от выбранного аналога функции профиля примеси.

Из выражения (4.9) следует, что аэродинамическое сопротивление слоя равно:

$$R_a = \int_{z_0}^{z_r} \frac{\phi(\xi)}{ku_*z} dz. \quad (4.10)$$

Если безразмерную градиентную функцию заменить интегральной градиентной функцией $\psi_{h,m} = \int (1 - \phi_{h,m})/(\xi) d\xi$, то выражение (4.10) переписывается в виде:

$$R_a = \frac{\ln(z_r/z_0) - \psi}{ku_*}, \quad (4.11)$$

Существует много различных интерполяционных формул для безразмерных функций ϕ_h и ϕ_m , полученных с помощью полевых экспериментов [98–100]. В

данной работе используются выражения, полученные в [101, 102] для условий неустойчивого пограничного слоя атмосферы ($\xi < 0$) и для устойчивой атмосферы ($\xi > 0$), приведенные в работе [103]:

$$\Phi_m = \begin{cases} (1 - 16\xi)^{-\frac{1}{4}}, (\xi < 0) \\ 1 + a\xi + b(1 + c + d\xi) \exp(-d\xi), (\xi > 0) \end{cases} \quad (4.12)$$

$$\Phi_h = \begin{cases} (1 - 16\xi)^{-\frac{1}{2}}, (\xi < 0) \\ 1 + (1 + \frac{2}{3}a\xi)^{\frac{3}{2}} + b(1 + c + d\xi) \exp(-d\xi), (\xi > 0), \end{cases} \quad (4.13)$$

где $a=1$, $b=0.667$, $c=5$, $d=0.35$. На основе этих формул получается следующее выражение для интегральных градиентных функций:

$$\Psi_m = \begin{cases} 2\ln\left[\frac{(1+x)}{2}\right] + \ln\left[\frac{(1+x^2)}{2}\right] - \operatorname{atan}(x) + \pi/2, (\xi < 0) \\ -a\xi - b\left(\xi - \frac{c}{d}\right) \exp(-d\xi) - \frac{bc}{d}, (\xi > 0) \end{cases} \quad (4.14)$$

$$\Psi_h = \begin{cases} 2\ln\left[\frac{(1+x^2)}{2}\right], (\xi < 0) \\ 1 - (1 + \frac{2}{3}a\xi)^{\frac{3}{2}} - b\left(\xi - \frac{c}{d}\right) \exp(-d\xi) - \frac{bc}{d}, (\xi > 0), \end{cases} \quad (4.15)$$

где введено обозначение $x = \left(1 - 16\frac{z}{L}\right)^{\frac{1}{4}}$.

Одним из ключевых размерных параметров приземного слоя атмосферы является скорость трения (динамическая скорость) u_* – масштаб вертикального потока горизонтального импульса, т. е. чем выше скорость трения, тем больше механическая турбулентность, возникающая вследствие сдвига скорости ветра из-за торможения потока вязкими напряжениями вблизи подстилающей поверхности, и тем эффективнее протекает перемешивание импульса, энергии и примеси. Для определения скорости трения используются параметризационные схемы, либо она определяется из экспериментов, в ходе которых измеряются касательные напряжения на уровне подстилающей поверхности.

В [104] описана методика безитерационного определения скорости трения и

длины Мони́на-Обухова, основанная на расчете числа Ричардсона. Однако на практике чаще используют итерационный подход, согласно которому сначала производится оценка u_* в условиях нейтральной атмосферы ($\psi_{m,h} = 0$):

$$u_* = \frac{ku_r}{\ln(z_r/z_0)}, \quad (4.16)$$

где u_r – скорость потока воздуха на высоте z_r , м/с.

Далее вычисляется длина Мони́на-Обухова L , м, которая является характеристикой устойчивости приземного слоя атмосферы [105]:

$$L = -\frac{\rho c_p T_r u_*^3}{kgH_0}, \quad (4.17)$$

где ρ – плотность воздуха, кг/м³;

$c_p = 1004.67$ – удельная теплоемкость сухого воздуха при постоянном давлении, м²/(с²·K);

T_r – абсолютная температура на высоте z_r , K;

$g = 9.81$ – гравитационное ускорение, м/с²;

$k = 0.4$ – постоянная Фон Кармана;

H_0 – поток тепла на уровне земли, Вт/м².

Затем скорость трения уточняется по формуле:

$$u_* = \frac{ku_r}{\ln(z_r/z_0) - \psi_m\left(\frac{z_r}{L}\right) + \psi_m\left(\frac{z_0}{L}\right)}. \quad (4.18)$$

После этого L и u_* итеративно рассчитываются, используя выражения (4.17), (4.14) и (4.18) до тех пор, пока изменение длины Мони́на-Обухова от итерации к итерации не станет менее 1%.

Поверхностное сопротивление

Поверхностное сопротивление R_s зависит от эффективности улавливания частиц подстилающей поверхностью и определяется различными процессами осаждения, размерами осаждающихся частиц, атмосферными условиями и свойствами подстилающей поверхности. В модели Занга R_s параметризуется следующим образом:

$$R_s = \frac{1}{\varepsilon_0 u_* (E_B + E_{IM} + E_{IN}) R_1}, \quad (4.19)$$

где E_B, E_{IM}, E_{IN} – эффективность улавливания частиц поверхностью за счет броуновской диффузии, столкновения частиц с выступающими на подстилающей поверхности элементами за счет инерционного осаждения и зацепления частиц соответственно;

R_1 – поправочный коэффициент, учитывающий часть частиц отскакивающих от поверхности;

ε_0 – эмпирическая константа (в модели Занга принято $\varepsilon_0 = 3$).

Броуновское движение – это неупорядоченное движение взвешенных частиц вследствие случайных столкновений частиц с молекулами среды. Броуновское движение приводит к рассеянию частиц и определяется с помощью коэффициента диффузии, поэтому часто говорят о броуновской диффузии. Однако нужно заметить, что диффузия представляет собой перенос частиц из областей повышенных концентраций в области с малой концентрацией, в то время как в данном случае броуновская диффузия протекает из-за присутствия поверхности, поглощающей частицы аэрозоля [95].

Осаждение за счет броуновской диффузии имеет наибольшее значение для малых частиц с размерами $r_p < 0.1$ мкм [79]. В работах [106, 107] для учета влияния броуновской диффузии на осаждение частиц вводится понятие скорости улавливания частиц $V_B = Sh D_B / d_n$, которая зависит от числа Шервуда Sh , коэффициента броуновской диффузии D_B , m^2/c и размера элемента поверхности d_n , на которой происходит осаждение. В работе Занга влияние броуновской диффузии учтено через эффективность E_B в формуле для расчета сопротивления подстилающей поверхности (4.19) и определяется как:

$$E_B = Sc^{-\gamma}, \quad (4.20)$$

где Sc – число Шмидта, которое определяется отношением кинематической вязкости воздуха ν , m^2/c к коэффициенту броуновской диффузии частиц

$$D_B, \text{ м}^2/\text{с}: Sc = \nu/D_B [108];$$

γ – модельный коэффициент, зависящий от класса подстилающего ландшафта (КПЛ) (табл. Б. 1, Б. 2).

Коэффициент броуновской диффузии частиц D_B равен [95]:

$$D_B = \frac{k_B T}{3\pi d_p \eta}, \quad (4.21)$$

где $k_B = 1.380658 \cdot 10^{-23}$ – константа Больцмана, $\text{кг} \cdot \text{м}^2/(\text{с}^2 \cdot \text{К})$.

Еще один процесс, ответственный за осаждение частиц, заключается в инерционном осаждении частиц на выступающих элементах поверхности: частицы, обладая бóльшей массой, чем молекулы воздуха, при искривлении линии тока перед препятствием движутся по траекториям, которые пересекают линии тока и оседают на препятствии. Огибание частицами препятствия характеризуется безразмерным числом Стокса St , которое определяется как отношение инерционной силы, действующей на частицу, к силе гидравлического сопротивления среды [109]. Таким образом, если $St \gg 1$, то частица наталкивается на препятствие, а при $St \ll 1$ частица огибает препятствие вместе с потоком. Число Стокса записывается как $St = V_g u_* / gA$ для поверхности покрытой растительностью (A – характеристический размер препятствия, который зависит от класса подстилающего ландшафта (КПЛ) и категории сезона (КС), табл. Б. 1, Б. 2) [94], и $St = V_g u_*^2 / g\nu$ для гладкой поверхности или поверхности с отвесными (обрывистыми) элементами шероховатости [110].

Существуют разные полуэмпирические выражения для эффективности улавливания частиц за счет инерционного осаждения частиц на поверхности [94, 106, 111]. В модели Занга используется выражение, предложенное в работе [88]:

$$E_{IM} = \left(\frac{St}{\alpha + St} \right)^\beta, \quad (4.22)$$

где константа α варьируется в зависимости от подстилающей поверхности (табл. Б. 1, Б. 2), а $\beta = 2$.

Процесс зацепления частиц поверхностью возникает, если частица

проходит мимо препятствия на расстоянии меньшем своего радиуса, касается препятствия и остается на его поверхности. Эффективность зацепления E_{IN} зависит от отношения размеров частиц и препятствия [112] и в модели Занга определяется простой формулой:

$$E_{IN} = \frac{1}{2} \left(\frac{d_p}{A} \right)^2, \quad (4.23)$$

где d_p – диаметр частицы, м.

Частицы размером больше 5 мкм могут отскакивать от поверхности после столкновения. Этот процесс учитывается введением поправочного коэффициента R_1 , который представляет собой долю частиц, прилипающих к поверхности. Для подстилающей поверхности, покрытой растительностью, используется следующее выражение для R_1 [94]:

$$R_1 = \exp(-b\sqrt{St}), \quad (4.24)$$

где $b=1$ используется в работе Занга.

Еще один важный процесс при осаждении частиц заключается в увеличении их размеров в условиях повышенной влажности. Радиус влажной частицы r_w рассчитывается с учетом радиуса сухой частицы r_d и относительной влажности [113]:

$$r_w = \left[\frac{C_1 r_d^{C_2}}{C_3 r_d^{C_4} - \log_{10} RH} + r_d^3 \right]^{\frac{1}{3}}, \quad (4.25)$$

где C_1, C_2, C_3, C_4 – эмпирические константы, перечисленные в табл. 4.1;

$RH = (0 \div 1)$ – относительная влажность.

Таблица 4.1. Константы для уравнения (4.25)

Тип аэрозоля	C_1	C_2	C_3	C_4
Морская соль	0.7674	3.079	$2.573 \cdot 10^{-11}$	-1.424
Городской	0.3926	3.101	$4.190 \cdot 10^{-11}$	-1.404
Сельскохозяйственный	0.2789	3.115	$5.415 \cdot 10^{-11}$	-1.399
$(NH_4)_2SO_4$	0.4809	3.082	$3.110 \cdot 10^{-11}$	-1.428

На рис. 4.1 представлена зависимость изменений радиусов частиц, рассчитанных по формуле 4.25, на примере морской соли. Кривые соответствуют различным значениям относительной влажности окружающего воздуха. Как видно, при влажности окружающего воздуха выше 80% размер частиц увеличивается больше чем в 1.5 раза.

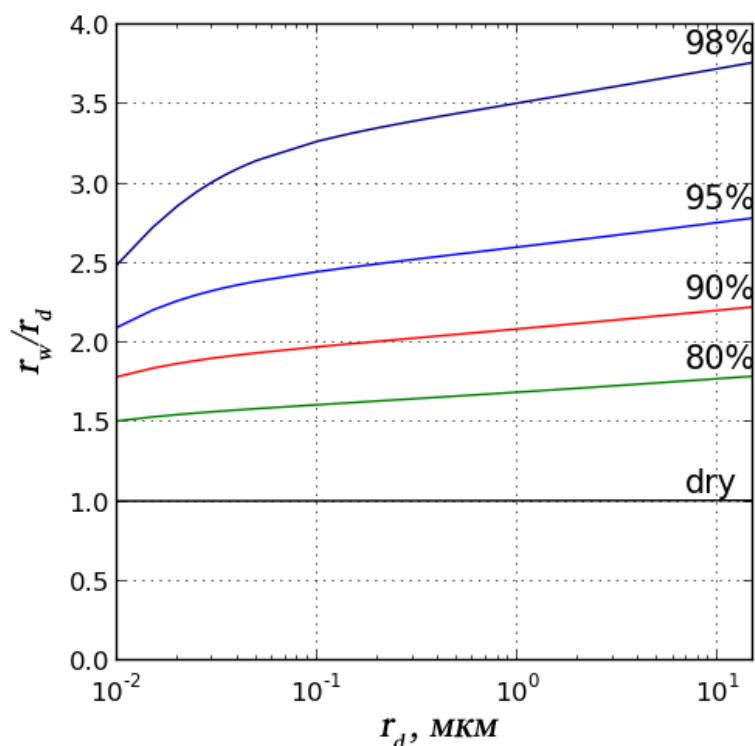


Рис. 4.1. Изменение размера частиц морской соли в условиях различной относительной влажности [113]

4.1.2 Результаты моделирования скоростей сухого осаждения частиц

На рис. 4.2 представлен характерный вид зависимости скорости сухого осаждения от размера частиц. Расчет проводился для следующих условий: тип подстилающей поверхности – трава (класс подстилающего ландшафта, КПЛ=6, см. табл. Б.1); летний период (категория сезона, КС=1, см. табл. Б.1); нейтральная стратификация атмосферы ($\xi = 0$); скорость трения $u_* = 0.5$ м/с; высота, на которой определялась скорость осаждения $z_r = 10$ м; плотность осаждающихся частиц $\rho_p = 2.0$ г/см³ (плотность сажевых частиц). На рисунке также показаны скорости, обусловленные отдельными процессами осаждения, при отсутствии всех других. Видно, что сухое осаждение малых частиц ($d_p < 1$ мкм) полностью

определяется процессом броуновской диффузии. Для крупных частиц большой вклад в суммарную скорость сухого осаждения вносит скорость седиментации, а также становятся значимыми процессы столкновения и улавливания частиц поверхностью.

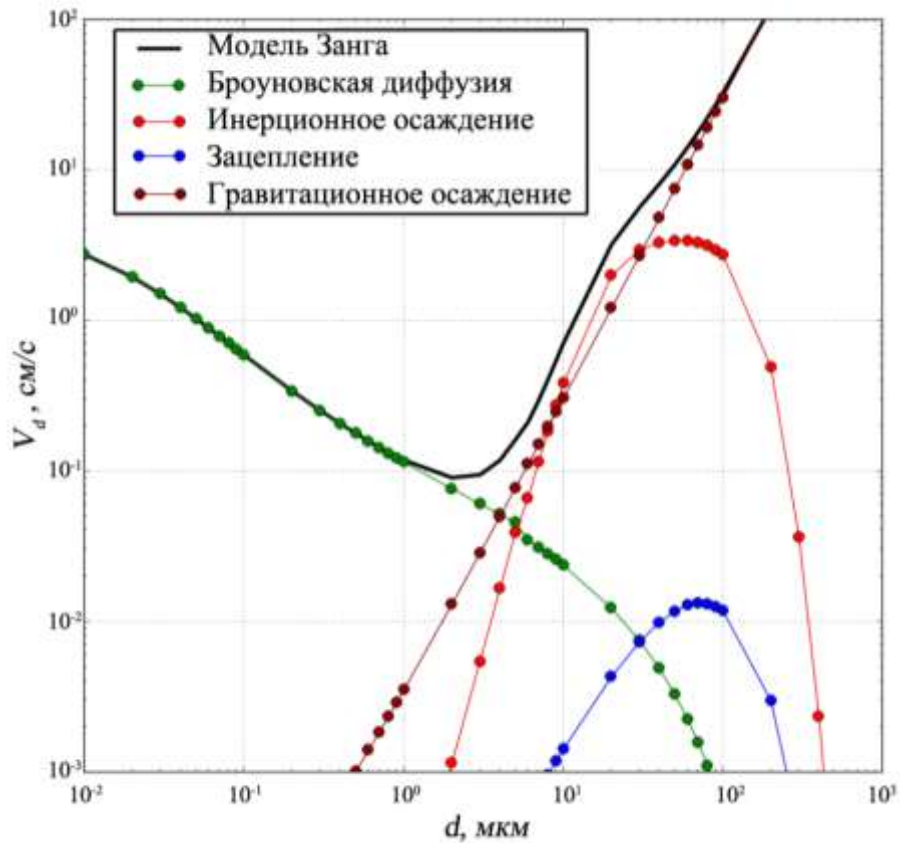


Рис. 4.2. Скорости сухого осаждения частиц, рассчитанные по модели Занга (КПЛ=6, КС=1, $z_r/L = 0$, $u_* = 0.5$ м/с, $z_r = 10$ м, $\rho_p = 2.0$ г/см³)

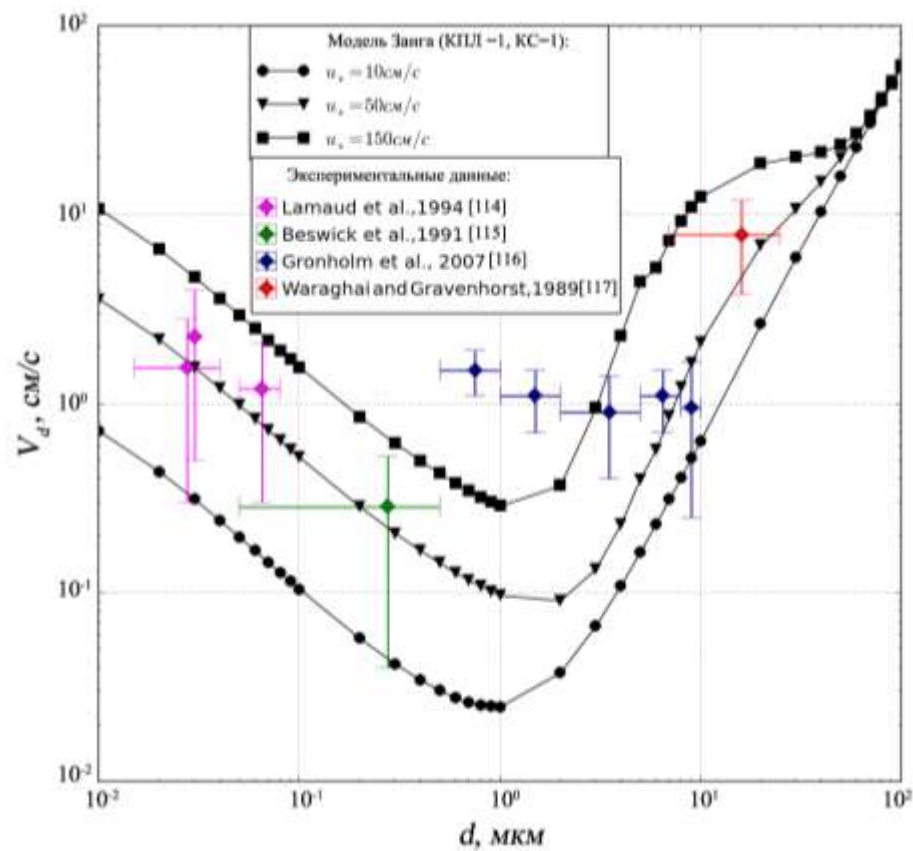
При сравнении скоростей сухого осаждения над принципиально различающимися типами подстилающей поверхности нужно учитывать, что задаваемые условия (в данном случае скорости трения) для различных типов поверхности соответствуют различным метеорологическим ситуациям. Так, установление определенного аэродинамического режима потока воздуха над более шероховатой поверхностью происходит при меньших скоростях ветра, чем над гладкой поверхностью (см. формулу (4.16) для случая нейтральной стратификации атмосферы).

На рис. 4.3 представлено сравнение расчетов скоростей сухого осаждения частиц по модели Занга с результатами экспериментов различных авторов

[114–120]. Из рисунка видно, что модель Занга слабо чувствительна к типу подстилающей поверхности. Следует отметить, что эта особенность характерна для большинства аналитических моделей сухого осаждения [79]. Минимальные скорости осаждения, рассчитанные на основе модели Занга, соответствуют диапазону частиц диаметром от 0.5 до 2 мкм. Рассчитанные скорости осаждения над поверхностью травы существенно завышены по сравнению с экспериментальными данными, особенно в диапазоне малых частиц (рис. 4.3 б). С экспериментальными данными лучше согласуются расчеты для случая первой категории подстилающей поверхности (хвойные деревья, $K_{ПЛ}=1$) (рис. 4.3 а).

Сравнивая модельные расчеты с экспериментальными данными, следует заметить, что подобное сопоставление следует проводить с осторожностью. Для каждого типа подстилающей поверхности результаты измерений, доступные в литературе, варьируются в широких пределах (иногда даже в рамках одного исследования), которые обусловлены различными условиями проведения экспериментов (свойства поверхности, условия стабильности атмосферы, измерительные погрешности и т. д.).

а)



б)

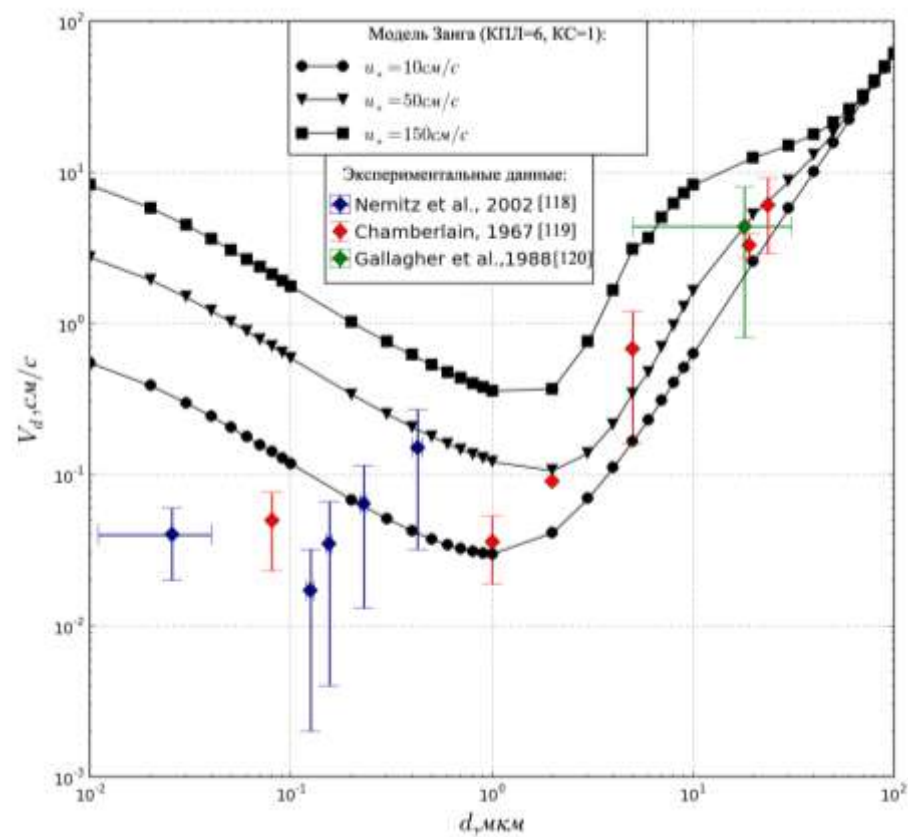


Рис. 4.3. Сравнение модельных расчетов скоростей сухого осаждения с экспериментальными данными:
а) КПЛ=1 (хвойный лес); б) КПЛ=6 (травя)

4.2 Расчет трехмерных траекторий движения воздушных потоков

Для корректной оценки трехмерного поля концентрации по данным измерений аэрозольных характеристик атмосферы на Среднем Урале рассчитывались обратные траектории движения воздуха на разных высотах. Расчеты проводились с помощью программного комплекса FLEXTRA [16, 25, 121]. В качестве входных метеоданных использовались данные базы реанализа ERA Interim Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (ECMWF – European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, <http://www.ecmwf.int/>). Для расчета обратных траекторий программой FLEXTRA необходимы двухмерные (2D) и трехмерные (3D) поля следующих параметров:

- p_s [Па] — давление на поверхности (2D);
- T [K] — температура воздуха (3D);
- u [м/с] — зональная скорость (3D);
- v [м/с] — меридиональная скорость (3D);
- w [Па/с] — вертикальная скорость (3D).

Пространственное разрешение доступных данных $0.75^\circ \times 0.75^\circ$, с разрешением по высоте – 60 уровней расчетной модели ECMWF (до высот около 5 гПа) и с временным разрешением шесть часов (00:00, 06:00, 12:00, 18:00). Для учета рельефа используется цифровая модель GTOPO30 (<https://lta.cr.usgs.gov/GTOPO30>).

С помощью программного комплекса FLEXTRA были выполнены расчеты трехмерных обратных траекторий, длиной 168 часов (семь суток) каждая, с шагом 15 мин., стартующих каждый час в точке расположения пункта мониторинга AERONET на Среднем Урале (59.54500° в. д., 57.03833° с. ш.) на 15 уровнях (высоты старта траекторий над уровнем земли, м: 250, 500, 1000, 1500, 2000, 3000, 4000, 5000, 6000, 7000, 8000, 9000, 10000, 11000, 12000).

На рис. 4.4 представлен пример траекторий, рассчитанных FLEXTRA для высот до шести километров, трехмерное представление (а) и вид сверху (б). Эти траектории характеризуют путь, которым шли воздушные потоки до прихода 22 января 2010 г. в 9:30 (GMT) в пункт мониторинга на Среднем Урале.

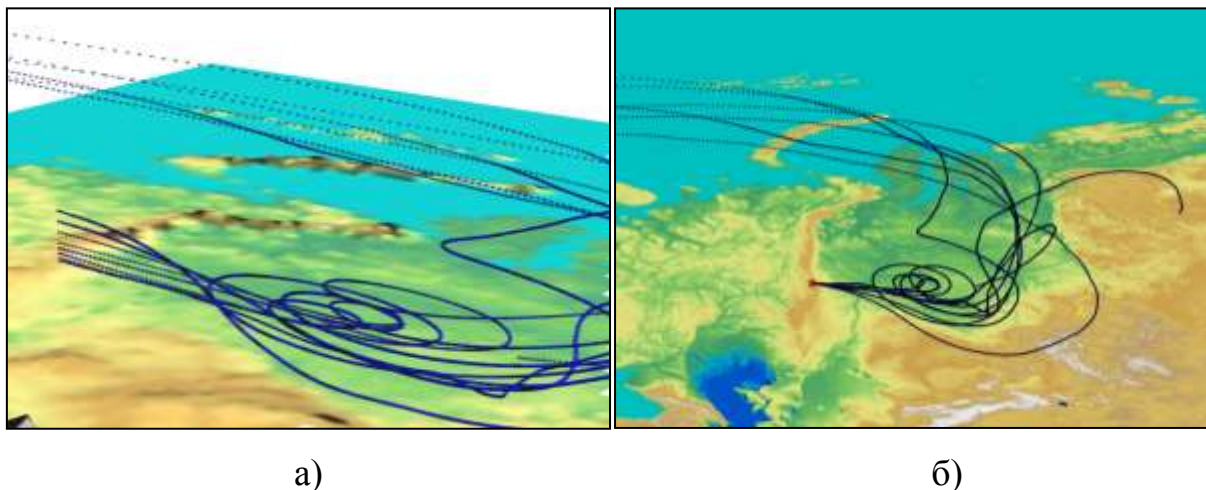


Рис. 4.4. Трехмерный вид (а) и вид сверху (б) обратных траекторий, рассчитанных с помощью программного комплекса FLEXTRA

4.3 Вертикальный профиль распределения аэрозоля

При решении задачи восстановления трехмерного среднего поля концентраций аэрозоля методом ФЛА в качестве признака, для которого решается уравнение сохранения, как и в случае двумерной задачи, используется объемная концентрация тонкодисперсной фракции аэрозоля. Для учета вертикального распределения аэрозоля используется эмпирическая модель профиля атмосферного аэрозоля для региона Западной Сибири [122].

Фактором заполнения аэрозоля в [122] называется безразмерная величина, равная объемной концентрации аэрозоля, т. е. отношению объема аэрозольных частиц к объему воздуха в тех же единицах измерения. Интегрирование среднего профиля фактора заполнения V рассматриваемой модели (табл. 4.2) по высоте дает объем частиц аэрозоля V_s , $\text{мкм}^3/\text{мкм}^2$ в столбе воздуха высотой 5 км (табл. 4.3). Если профиль V для высот от $H=5$ км до $H=12$ км аппроксимировать линейной функцией $V_H = aH + b$, при этом

считать $V_{12\text{км}} = 0$, тогда $a = -\frac{V_{5\text{км}}}{7}$ и $b = \frac{12 \cdot V_{5\text{км}}}{7}$, следовательно, интегрирование профиля фактора заполнения для высот от 5 до 12 км дает:

$$\int_5^{12} V_H dH = \int_5^{12} \left(-\frac{V_{5\text{км}}}{7} H + \frac{12 \cdot V_{5\text{км}}}{7} \right) dH = 3.5 V_{5\text{км}}$$

Таблица 4.2. Фактор заполнения [$\text{мкм}^3/\text{мкм}^3$] тонкодисперсной фракции аэрозоля на разных высотах для разных сезонов [122]

Н, км	Фактор заполнения $V \cdot 10^{12}$			
	Зима	Весна	Лето	Осень
0	36.1139	112.0325	15.4786	37.0775
0.5	11.0921	76.08475	14.1340	15.9613
1.0	6.459	54.76991	12.3560	12.7923
1.5	3.9648	28.36364	10.1780	8.3732
2.0	2.2898	14.86145	6.9560	4.4225
3.0	1.2694	8.52558	4.1560	1.6511
4.0	0.7129	6.75094	1.2134	1.3264
5.0	0.5695	4.324	0.6022	1.1151

Таблица 4.3. Объемная концентрация частиц аэрозоля в столбе воздуха высотой 5 и 12 км

	Зима	Весна	Лето	Осень
$V_s(0-5 \text{ км}), \text{мкм}^3/\text{мкм}^2$	$21.93 \cdot 10^{-3}$	$133.15 \cdot 10^{-3}$	$33.24 \cdot 10^{-3}$	$32.74 \cdot 10^{-3}$
$V_s(0-12 \text{ км}), \text{мкм}^3/\text{мкм}^2$	$23.92 \cdot 10^{-3}$	$148.28 \cdot 10^{-3}$	$35.35 \cdot 10^{-3}$	$36.65 \cdot 10^{-3}$
V_{const}	$1.99 \cdot 10^{-12}$	$12.36 \cdot 10^{-12}$	$2.95 \cdot 10^{-12}$	$3.05 \cdot 10^{-12}$

Если полученное значение объемной концентрации частиц в столбе воздуха поделить на высоту столба, получится фактор заполнения в предположении равномерного распределения аэрозоля по высоте V_{const} .

Таким образом, вид профилей распределения аэрозоля по высоте можно охарактеризовать посредством введения коэффициента k (табл. 4.4), равного отношению фактического фактора заполнения на данной высоте V к фактору заполнения, полученного в предположении равномерного высотного распределения аэрозоля V_{const} (табл. 4.3).

Таблица 4.4. Коэффициенты, характеризующие вид средних вертикальных профилей концентраций аэрозоля для различных сезонов

Н, км	к _{зима}	к _{весна}	к _{лето}	к _{осень}
0	18.1477	9.0641	5.2470	12.1566
0.5	5.5739	6.1557	4.7912	5.2332
1.0	3.2457	4.4312	4.1885	4.1942
1.5	1.9924	2.2948	3.4502	2.7453
2.0	1.1507	1.2024	2.3580	1.4500
3.0	0.6379	0.6898	1.4088	0.5413
4.0	0.3582	0.5462	0.4113	0.4349
5.0	0.2862	0.3498	0.2041	0.3656

В итоге, для пересчета исходной объемной концентрации в столбе воздуха на фактор заполнения на определенной высоте согласно модели [122], необходимо сначала рассчитать фактор заполнения в предположении равномерного распределения концентраций по высоте ($V'_{const} = \frac{V_s}{12 \cdot 10^9 \text{ мкм}}$), а затем умножить его на соответствующий сезону и высоте коэффициент из табл. 4.4: $V' = k \cdot V'_{const}$. В таком случае интегральная концентрация в столбе воздуха равна концентрации, измеренной прибором в определенный момент времени, а вид вертикального профиля распределения аэрозоля соответствует модельному.

4.4 Глобальная цифровая модель рельефа GTOPO30

Для учета высоты поверхности Земли над средним уровнем моря в трехмерном варианте метода ФЛА была использована глобальная цифровая модель рельефа GTOPO30 (<https://lta.cr.usgs.gov/GTOPO30>), разработанная Геологическим комитетом США (U.S. Geological Survey). Набор данных GTOPO30 представлен в международной системе координат WGS84 (World Geodetic System 1984, [123]) и охватывает весь земной шар, при этом имеет горизонтальное разрешение 30 угловых секунд (приблизительно 1 км), т. е.

размер карты 43 200 на 21 600 ячеек. Данные доступны в виде набора файлов, содержащих 33 части карты: 27 частей размером $40^\circ \times 50^\circ$ в области от 60° ю. ш. до 90° с. ш. и от 180° з. д. до 180° в. д., и шести частей размером $30^\circ \times 60^\circ$ в области от 60° ю. ш. до 90° ю. ш. и 180° з. д. до 180° в. д. (рис. 4.5). Каждый файл носит название, обозначающее координаты левого верхнего угла соответствующей части карты, например, файл e020n40 содержит информацию о рельефе в области размером $40^\circ \times 50^\circ$ с координатами левого верхнего угла 20° в. д. и 40° с. ш.

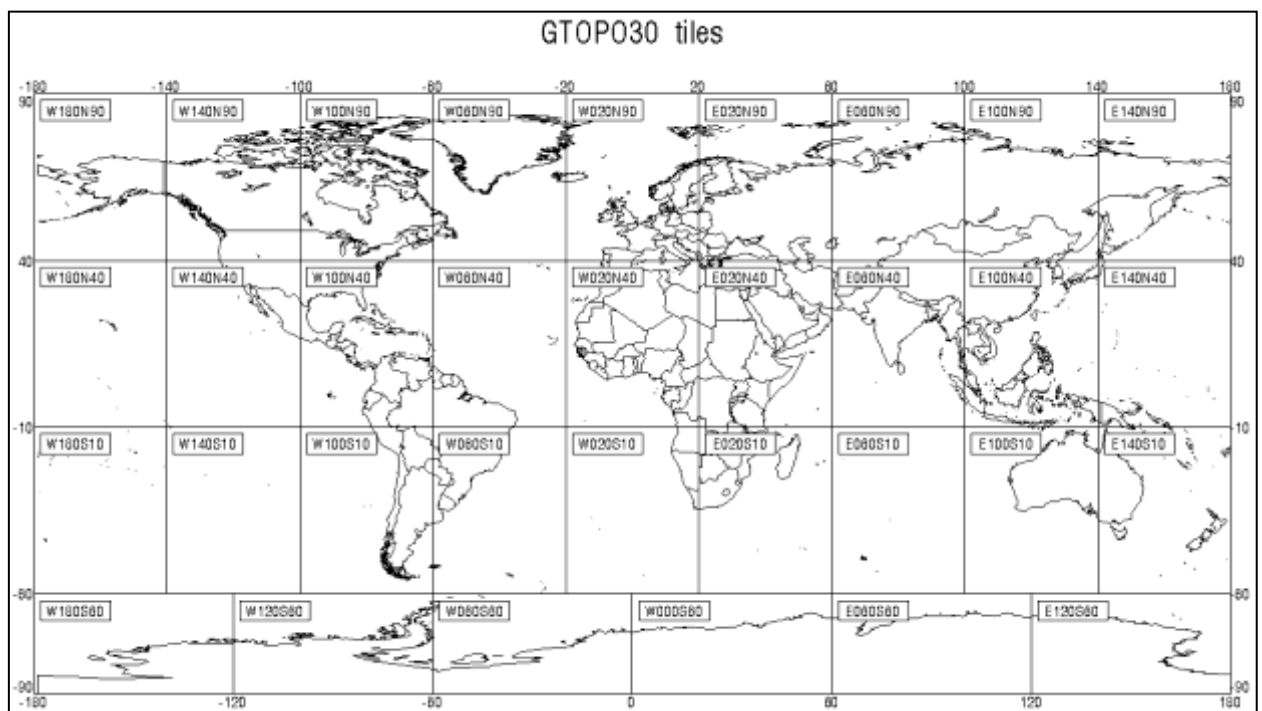


Рис. 4.5. Районирование земной поверхности в глобальной цифровой модели рельефа GTOPO30 (<https://lta.cr.usgs.gov/GTOPO30>)

Данные о каждой части карты доступны в виде восьми файлов, имеющих следующие форматы:

- *.DEM – бинарный файл, содержащий данные модели рельефа;
- *.HDR – заголовочный текстовый файл ASCII для DEM-файла, содержащий информацию о размере и координатах области;
- *.DMW – текстовый файл ASCII, содержащий информацию о координатах области, которые могут быть использованы для географической привязки данных;

*.STX – текстовый файл ASCII, который содержит статистику данных в DEM-файле;

*.PRJ – текстовый файл ASCII, который описывает географическую проекцию, в которой представлены данные в DEM-файле;

*.GIF – файл с графическим изображением данных в каждой области;

*.SRC – бинарный файл, который содержит информацию об источниках, из которых была получена информация о рельефе для каждой ячейки DEM-файла;

*.SCH – заголовочный текстовый файл ASCII для SRC-файла, содержащий информацию о размере и координатах области.

Для создания в ГИС GRASS растровой карты рельефа (рис 4.6) сначала с помощью инструмента *r.in.bin* импортируются бинарные DEM-файлы и создаются растровые карты для каждой из 33 частей, а затем с помощью процедуры *r.patch* все части «склеиваются» в одну растровую карту [52].

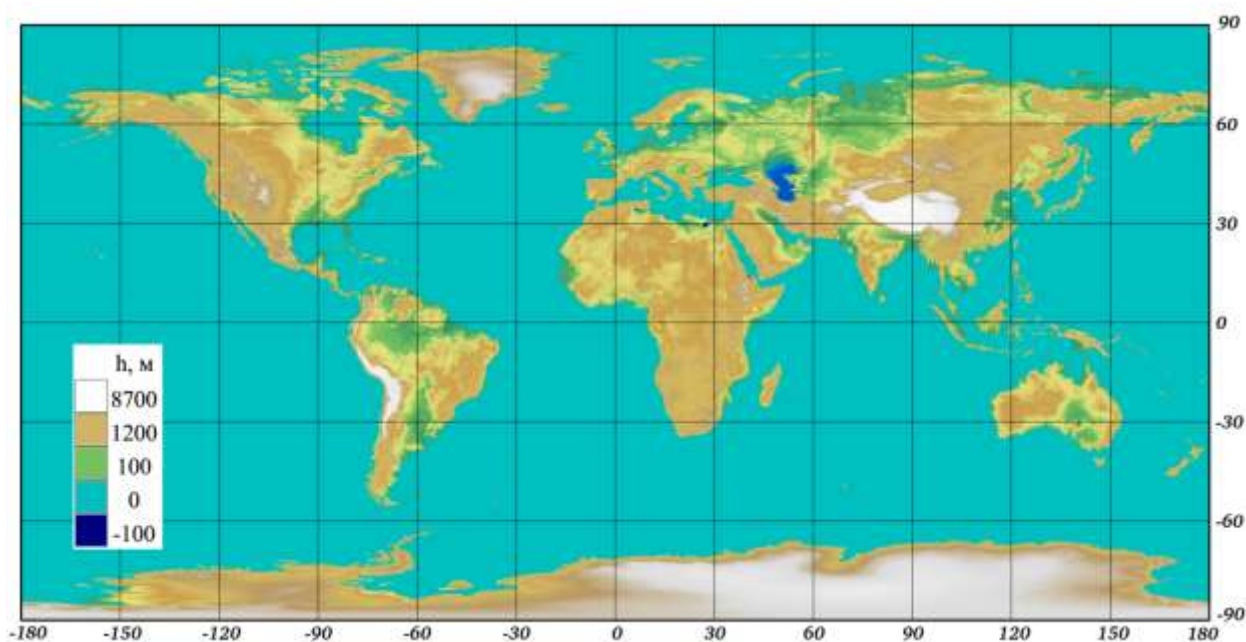


Рис. 4.6. Визуализация в ГИС GRASS глобальной цифровой модели рельефа GTOPO30 (<https://lta.cr.usgs.gov/GTOPO30>)

В настоящей работе в трехмерном варианте метода ФЛА рельеф учитывается достаточно грубо посредством учета различия объемов эйлеровых ячеек на нижнем расчетном уровне. Для этих целей в ГИС GRASS

пространственное разрешение растровой карты рельефа задается равным размеру расчетной ячейки, используемой при моделировании методом ФЛА (обычно $1^\circ \times 1^\circ$). Полученная таким образом карта импортируется в ASCII файл и помещается в таблицу, которая содержит средние высоты поверхности земли над уровнем моря в ячейках расчетной области.

4.5 Трехмерное среднее поле распределения концентрации тонкодисперсного аэрозоля

При моделировании трехмерных полей концентраций тонкодисперсного аэрозоля с помощью модифицированного метода ФЛА используются траектории движения воздуха для различных уровней над поверхностью земли и концентрации на соответствующих высотах, рассчитанные на основе эмпирической модели вертикального профиля аэрозоля. На нижнем модельном уровне учитывается рельеф местности, а также вводится поток сухого осаждения частиц на подстилающую поверхность.

4.5.1 Результаты моделирования по данным фотометрических измерений на Среднем Урале

Расчеты трехмерного поля концентраций тонкодисперсного аэрозоля на Среднем Урале проводились внутри области (50° – 70°) в. д. и (50° – 70°) с. ш. с использованием результатов спектральных фотометрических измерений на станции в п. Коуровка (близ Екатеринбурга) сети AERONET за 2010 г. По высоте расчетная область ограничивалась 12 км. Размеры эйлеровых ячеек задавались $1^\circ \times 1^\circ$ по горизонтали, и 1000 м по вертикали.

На рис. 4.7 представлены результаты расчетов на разных высотах, где концентрации приведены нормированными на медианное значение содержания аэрозоля в точке проведения измерений на высоте 500 м, рассчитанное на основе профиля для летнего периода ($10.733 \cdot 10^{-12}$

мкм³/мкм³). Крестиком обозначен пункт мониторинга сети AERONET – Екатеринбург (п. Коуровка). Видно, что на нижнем уровне в центральной части расчетной области выделяется шлейф повышенных концентраций аэрозоля, вытянутый с запада на восток, при этом южная и северная части значительно чище. Данная особенность качественно сохраняется до высот 2–3 км, но концентрации аэрозоля существенно снижаются. На высотах 4–5 км наблюдаются очень малые уровни концентраций, за исключением юго-западной части расчетной области.

На рис. 4.8 представлены вертикальные сечения рассчитанного поля концентрации тонкодисперсного аэрозоля в широтной (а) и меридиональной (б) плоскостях, проходящих через центр ячейки, в которой расположен пункт мониторинга сети AERONET на Среднем Урале. Также на рисунках показаны несколько рассчитанных вертикальных профилей для ячеек, координаты центров которых обозначены в верхнем правом углу каждой диаграммы. Красным выделен профиль, рассчитанный в ячейке расположения пункта мониторинга. Видно, что вертикальные распределения аэрозоля, полученные с помощью моделирования методом ФЛА, в основном сохраняют вид начального экспериментального профиля, т. е. наблюдается уменьшение концентраций с ростом высоты во всей расчетной области.

Интегрирование по высоте полей содержания аэрозоля на разных уровнях (мкм³/мкм³) дает объемную концентрацию аэрозоля в столбе воздуха (мкм³/мкм²). На рис. 4.9 а приведено суммарное среднее поле объемной концентрации тонкодисперсного аэрозоля. Сопоставляя полученное поле с результатами спутниковых измерений АОТ (рис. 4.9 б) видны общие закономерности, а именно, области повышенных уровней концентраций аэрозоля тянутся с запада на восток, в то время как северная и южная части карт характеризуются существенно более низкими концентрациями. Видны и некоторые различия, которые можно связать с тем, что такое сопоставление достаточно грубое, так как АОТ, хоть и является мерой содержания аэрозоля в воздухе, тем не менее является оптической характеристикой атмосферы.

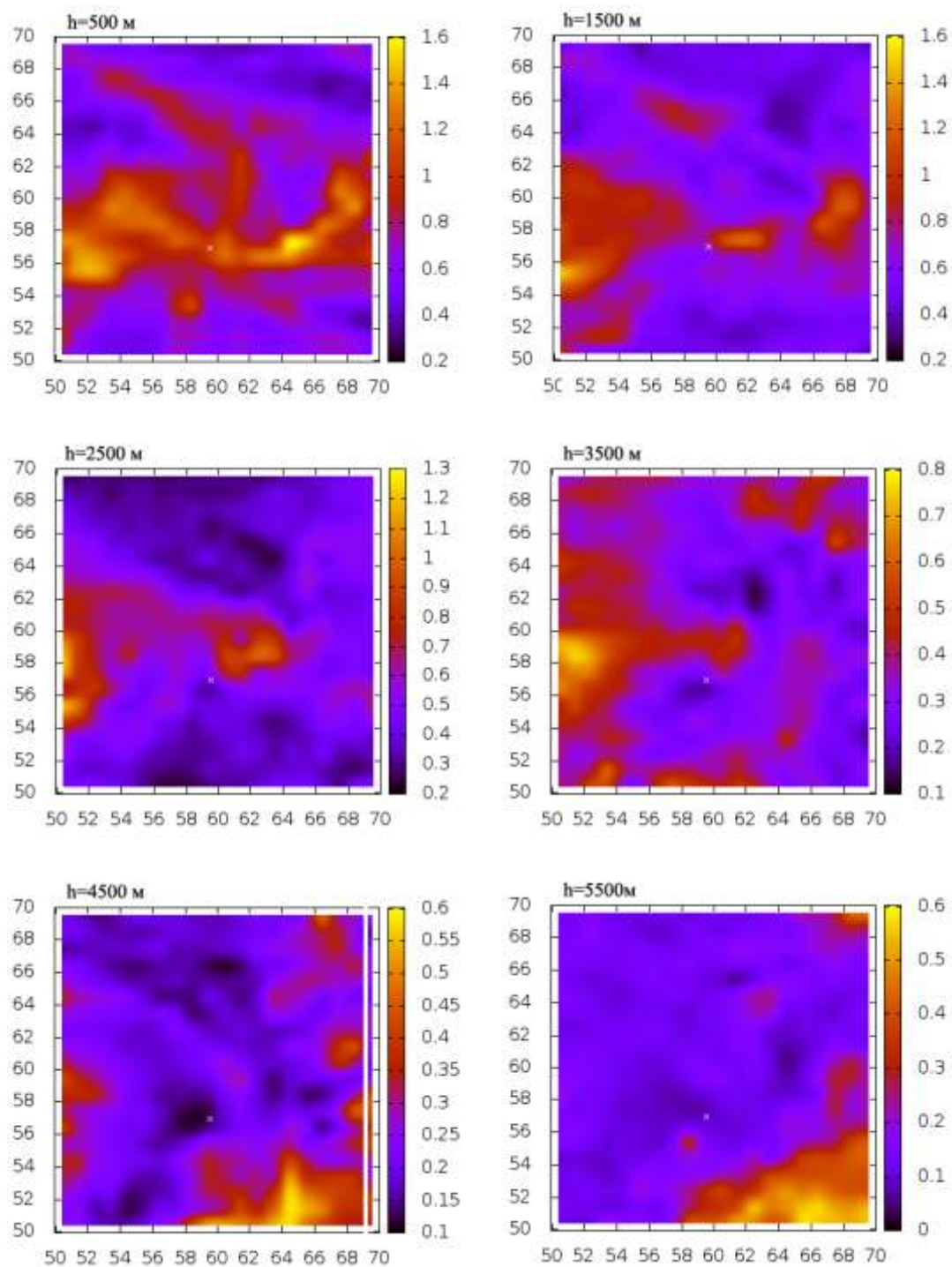


Рис. 4.7. Средние поля концентраций тонкодисперсного аэрозоля на разных высотах от 500 до 5500 м на Среднем Урале

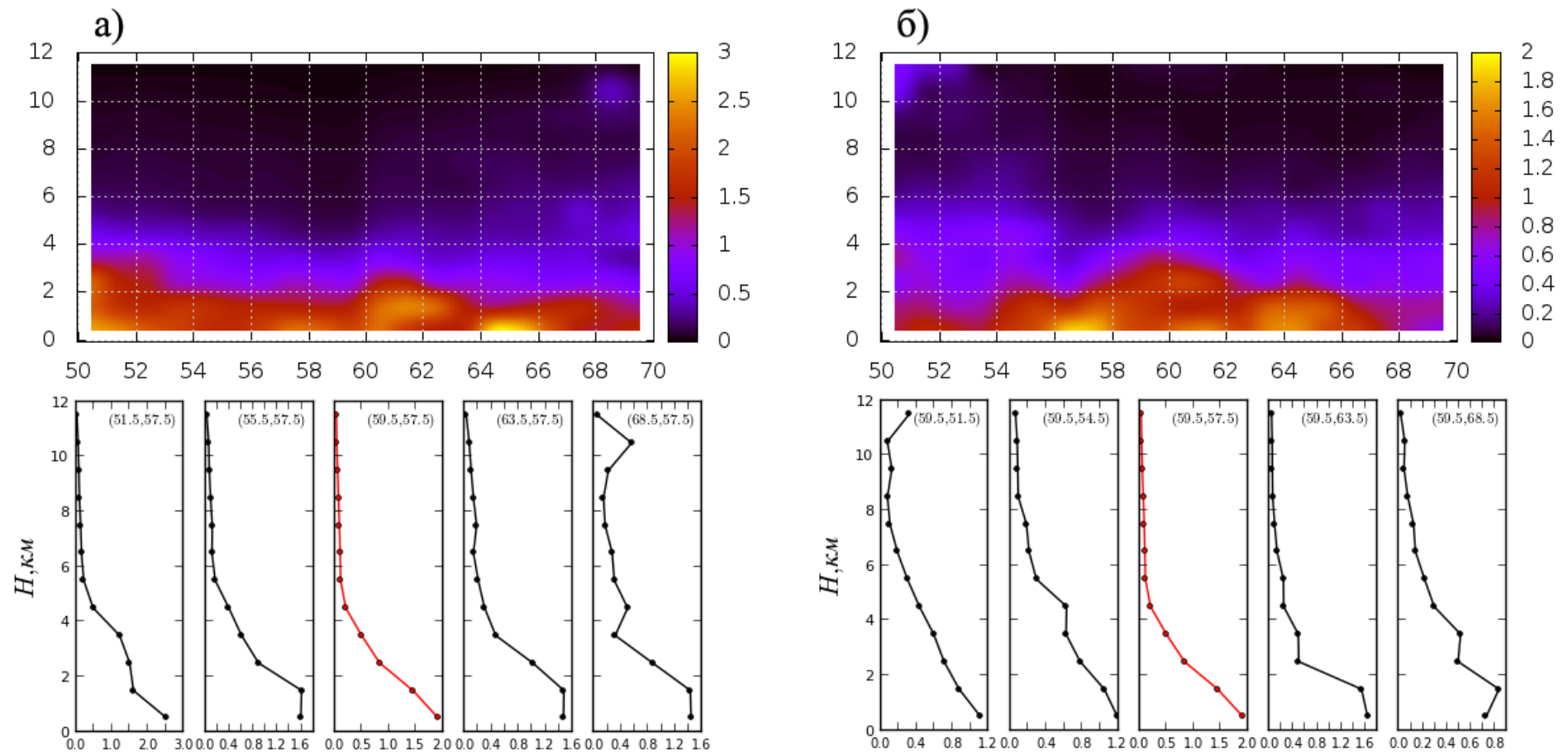


Рис. 4.8. Широтный (а) и меридиональный (б) срезы трехмерного поля концентрации тонкодисперсного аэрозоля и некоторые соответствующие вертикальные профили распределения аэрозоля

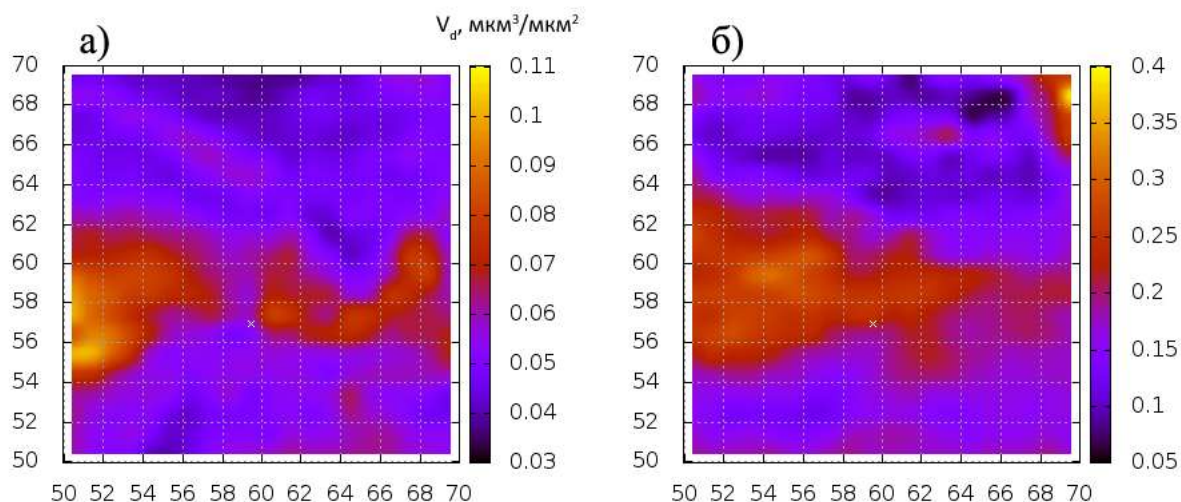


Рис. 4.9. Суммарное поле объемной концентрации тонкодисперсного аэрозоля, рассчитанное методом ФЛА (а); среднее поле АОТ тонкодисперсной фракции аэрозоля по спутниковым измерениям MODIS (б)

4.5.2 Результаты моделирования по данным фотометрических измерений в Западной Сибири

Расчеты трехмерного поля концентраций тонкодисперсного аэрозоля для региона Западной Сибири проводились внутри области (80° – 90°) в. д. и (50° – 60°) с. ш. на основе спектральных фотометрических измерений в Томске, проводимых в рамках программы аэрозольных наблюдений AERONET за 2004–2010 гг. По высоте расчетная область ограничивалась шестью километрами. Размеры эйлеровых ячеек задавались $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ по горизонтали, и 1000 м по вертикали.

Для моделирования трехмерного поля концентрации аэрозоля в данном случае использовались обратные траектории движения воздушных частиц на четырех изобарических поверхностях (950, 850, 700, 500 гПа), прибывающих в пункт мониторинга сети AERONET в Томске, рассчитанные Т. Кучерой (НАСА, Годдардский центр космических полетов, США) и доступные на сайте <http://croc.gsfc.nasa.gov/aeronet/>. Для учета распределения аэрозоля по высоте использовалась модель вертикального профиля для региона Западной Сибири,

разработанная в Институте оптики атмосферы [122] (см. § 4.3). При расчетах учитывалась скорость сухого осаждения частиц на подстилающую поверхность, оценка которой проводилась с помощью модели, описанной в § 4.1.

На рис. 4.10 а представлено пространственное распределение средней за расчетный период с 2004 по 2010 г. скорости сухого осаждения тонкодисперсной фракции аэрозоля (аэрозоль аппроксимировался монодисперсной фракцией с эффективным радиусом 0.35 мкм). Как следует из результатов моделирования, в рассматриваемой области значения средних скоростей сухого осаждения значительно варьируются, что объясняется различием преобладающих метеоусловий в разных частях расчетной области за рассматриваемый период. На рис. 4.10 б изображено пространственное распределение средней плотности потока сухого осаждения аэрозольных частиц на подстилающую поверхность в рассматриваемом регионе Западной Сибири, построенное с учетом рассчитанного методом ФЛА среднего поля концентрации.

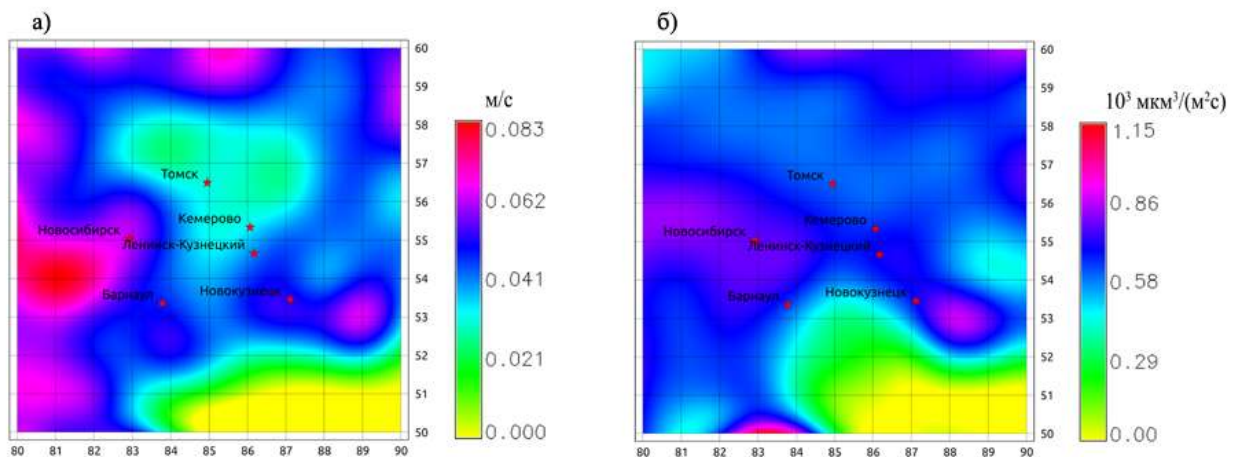


Рис. 4.10. Пространственное распределение: а) средняя за 2004–2010 гг. скорость сухого осаждения; б) средняя плотность потока сухого осаждения тонкодисперсного аэрозоля на подстилающую поверхность

На рис. 4.11 приведены средние поля концентраций ($\text{мкм}^3/\text{мкм}^3$) тонкодисперсного аэрозоля на разных высотах до 3500 м в регионе Западной Сибири. На юго-востоке расчетной области на всех уровнях наблюдаются повышенные концентрации аэрозоля, которые, однако, лежат вне области достоверного моделирования, т. е. число траекторий, приходящих из этого района, недостаточно для проведения содержательного анализа. Похожие «пятна»

присутствуют в этой области и в случае расчета с использованием квазидвумерного варианта метода ФЛА, когда использовались объемные концентрации аэрозоля во всем столбе воздуха, а динамика атмосферы учитывалась с использованием траекторий только на одном уровне 950 гПа. На рис. 4.11 штриховкой выделены территории, не попавшие в зоны достоверного моделирования для соответствующих высот. Видно, что на всех модельных уровнях юго-восток расчетной области не попадает в зону достоверного моделирования, что объясняется преимущественно западным переносом воздушных масс в данном регионе.

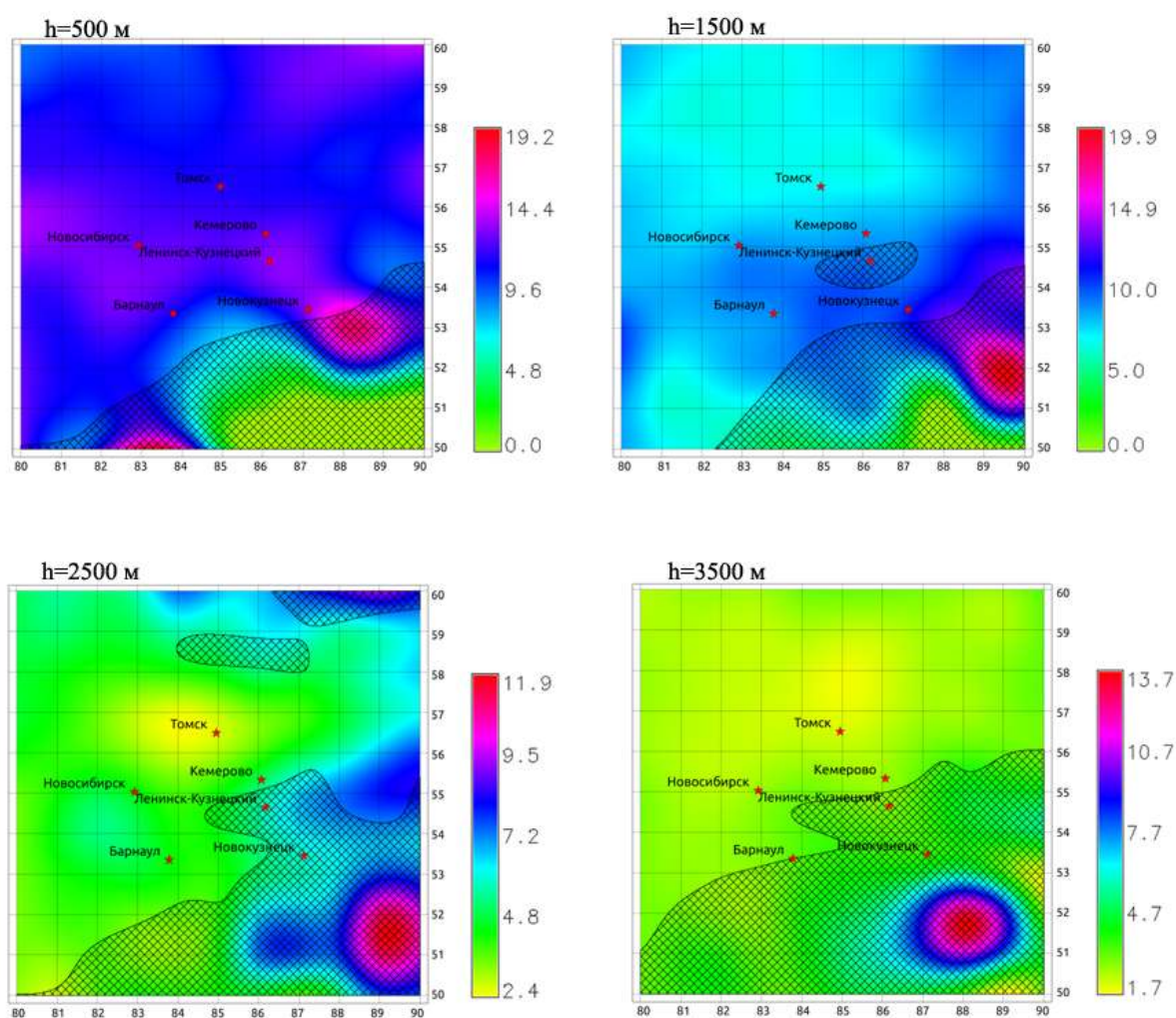


Рис. 4.11. Средние поля концентраций тонкодисперсного аэрозоля на разных высотах от 500 до 3500 м для региона Западной Сибири

При сравнении среднего поля концентраций тонкодисперсного аэрозоля, рассчитанного методом ФЛА, с результатами спутниковых измерений в регионе

Западной Сибири, восточная часть расчетной области обрезана. Это сделано из-за наличия повышенных уровней концентраций на юго-востоке области, обладающих малой достоверностью, что не позволяет визуально оценить другие особенности рассматриваемых полей. На рис. 4.12 а представлено суммарное по высоте среднее поле концентрации тонкодисперсного аэрозоля, а на рис. 4.12 б – среднее за 2004–2010 гг. АОТ атмосферы по результатам спутниковых измерений MODIS. Общей закономерностью является область повышенных концентраций между 53° – 56° с. ш., тянущаяся с запада на восток.

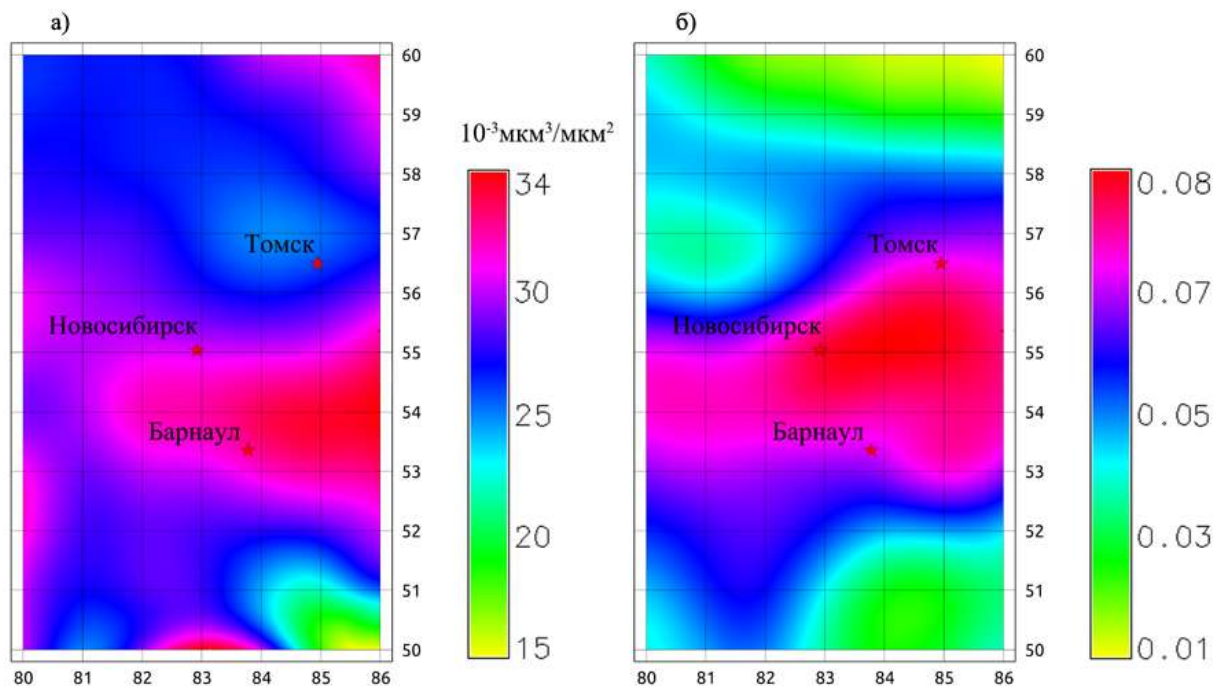


Рис. 4.12. Сравнение результатов моделирования с данными спутниковых измерений: а) суммарное поле объемной концентрации тонкодисперсного аэрозоля, рассчитанное методом ФЛА; б) среднее поле АОТ тонкодисперсной фракции аэрозоля по измерениям MODIS

Сопоставление результатов моделирования с данными дистанционного спутникового зондирования атмосферы продемонстрировало возможность использования метода ФЛА для решения задач восстановления трехмерных средних полей концентраций аэрозоля.

Основные результаты главы 4

1. Метод ФЛА модифицирован для решения задачи построения трехмерных полей концентраций тонкодисперсного аэрозоля в атмосфере, что потребовало усложнения алгоритма в нескольких направлениях: учет процессов сухого осаждения аэрозоля на подстилающую поверхность; использование трехмерных обратных траекторий движения воздушных потоков, рассчитываемых для разных высот над поверхностью земли; расчет концентраций примеси на разных высотах согласно эмпирической модели вертикального профиля содержания аэрозоля; учет рельефа Земли.

2. Подробно рассмотрена модель сухого осаждения Занга, совмещенная с моделями безразмерных градиентных функций профилей температуры и импульса. В рассмотренной параметризационной модели учитываются вертикальное турбулентное и гравитационное перемещение примеси, а также оседание частиц на поверхность за счет процессов броуновской диффузии, столкновения и захвата частиц. Приведены результаты расчетов скоростей сухого осаждения и сравнение расчетной модели сухого осаждения с экспериментальными данными разных авторов.

3. С использованием модифицированного метода ФЛА на основе результатов спектральных фотометрических измерений сети AERONET восстановлены трехмерные средние поля концентраций тонкодисперсного аэрозоля для региона Среднего Урала и региона Западной Сибири. Проведено сопоставление результатов моделирования с данными дистанционного спутникового зондирования атмосферы, которое показало возможность применения метода ФЛА для решения задач восстановления трехмерных средних полей концентраций аэрозоля.

Заключение

Привлечение данных о динамике атмосферы оказывается полезным для извлечения новой полезной информации о результатах измерений.

На основе информации о динамике атмосферы проведены оценки зависимостей средних плотностей потоков аэрозоля и средних объемных концентраций аэрозольных частиц в столбе атмосферы от направлений прихода воздушных потоков для разных географических регионов страны (европейская часть России, Средний Урал, Западная Сибирь, Дальний Восток, Якутия). За период 2004–2010 гг. на всех станциях мониторинга, кроме Якутска, преобладал перенос аэрозоля в северном направлении. Максимальные значения плотностей потоков аэрозоля в меридиональном направлении наблюдались в европейской части России. Суммарный перенос аэрозоля с запада на восток максимален для станции мониторинга, расположенной на Дальнем Востоке (Уссурийск). Максимальные значения медиан среднедневных объемных концентраций аэрозоля в столбе атмосферы зафиксированы в Москве и Уссурийске.

Более сложный подход требуется для решения задачи о зависимости содержания аэрозоля в атмосфере от типов ландшафта, над которыми проходили воздушные потоки. Задача решается с помощью привлечения возможностей ГИС-технологий. Выполнен совместный анализ результатов измерений АОТ атмосферы на Среднем Урале и траекторий движения воздушных частиц. Полученные результаты позволяют сделать вывод о существовании статистически значимой зависимости значений АОТ от того, над каким типом ландшафта проходил воздушный поток до прибытия в пункт мониторинга. Медианные значения АОТ, измеренные в случае прихода воздушных потоков, траектории которых проходили над засушливыми почвами (0.17) и обрабатываемыми территориями (0.18), статистически значимо выше медиан АОТ, измеренных в моменты прихода потоков, не проходивших над данными типами ландшафтов (0.14 и 0.13) соответственно.

Комплексный подход к анализу множества обратных траекторий,

используемый в методах СОТ и в методе ФЛА в частности, позволяет оценивать пространственную структуру аэрозольного загрязнения атмосферы. В результате решения квазидвумерной задачи методом ФЛА проведена оценка среднего поля объемной концентрации тонкодисперсного аэрозоля на территории России. Среднее поле концентраций тонкодисперсного аэрозоля, восстановленное на основе измерений аэрозольных характеристик атмосферы на шести станциях мониторинга сети AERONET, расположенных на территории России, в период с 2004 по 2010 г., обладает следующими особенностями: область повышенных значений концентраций тонкодисперсного аэрозоля зафиксирована в средних и южных широтах и вытянута с запада на восток; самые высокие концентрации тонкодисперсной фракции аэрозоля обнаружены в европейской части России, Китае (северо-восточнее Пекина), а также над Японским морем и некоторыми японскими островами; в северных широтах расчетной области над континентом наблюдаются самые низкие уровни концентраций тонкодисперсного аэрозоля.

Статистическое усреднение концентраций в расчетных ячейках пространства является одним из основных этапов метода ФЛА. Расчет погрешностей такого усреднения позволяет утверждать, что метод ФЛА дает обоснованные оценки поля концентрации примеси в атмосфере на больших расстояниях от пункта мониторинга. Проведенные расчеты позволяют сделать заключение о возможности использования плотности числа траекторий на расчетную ячейку $n_{tr} = 20$ в качестве критерия определения зоны достоверного моделирования (области, в которой относительная погрешность статистического усреднения концентраций не превышает 30 %).

Представлены результаты верификации метода ФЛА четырьмя способами, включая сравнение результатов моделирования с независимыми приборными измерениями и сопоставление среднего эффективного поля концентраций, полученного методом ФЛА, с пространственным распределением тонкодисперсного аэрозоля, полученного на основе измерений аэрозольной оптической толщи (АОТ) со спутниковых платформ. Несмотря на то, что квазидвумерное приближение имеет ряд ограничений, все рассмотренные

способы верификации указывают на возможность использования метода ФЛА для оценки средних полей концентраций тонкодисперсного аэрозоля.

Метод ФЛА модифицирован для решения задачи построения трехмерного поля концентраций аэрозоля в атмосфере, что потребовало усложнения алгоритма по нескольким направлениям: учет процессов сухого осаждения аэрозоля на подстилающую поверхность; использование трехмерных обратных траекторий движения воздушных потоков, рассчитываемых для разных высот над поверхностью земли; расчет концентраций примеси на разных высотах согласно модельному вертикальному профилю; учет рельефа Земли. С использованием модифицированного метода ФЛА на основе результатов спектральных фотометрических измерений сети AERONET восстановлены трехмерные средние поля концентраций тонкодисперсного аэрозоля для Среднего Урала и Западной Сибири. Проведено сопоставление результатов моделирования с данными дистанционного спутникового зондирования атмосферы, которое показало возможность применения метода ФЛА для решения задач восстановления трехмерных средних полей концентраций аэрозоля.

Литература

1. Пененко В. В., Коротков М. Г. Применение численных моделей для прогнозирования аварийных и экологически неблагоприятных ситуаций в атмосфере // Оптика атмосферы и океана. 1998. Т. 11, № 06. С. 567–572.
2. Алоян А. Е. Моделирование динамики и кинематики газовых примесей и аэрозолей в атмосфере / А. Е. Алоян; [отв. ред. Г. И. Марчук] Ин-т вычислительной математики РАН. М.: Наука, 2008. 415 с.
3. Рапута В. Ф., Садовский А. П., Олькин С. Е., Лаптева Н. А. Оценка состояния загрязнения города по данным мониторинга снежного покрова // Оптика атмосферы и океана. 1998. Т. 11, № 06. С. 602–605.
4. Рапута В. Ф., Садовский А. П., Олькин С. Е. Модель длительного загрязнения местности аэрозольными источниками // Оптика атмосферы и океана. 1997. Т. 10, № 06. С. 616.
5. Ramadan A. A. Air quality assessment in Southern Kuwait using diffusive passive samplers // Environ. Monitoring and Assessment. 2010. V. 160. P. 413–423.
6. Martin P., Cabañas B., Villanueva F. et al. Ozone and Nitrogen Dioxide Levels Monitored in an Urban Area (Ciudad Real) in central-southern Spain. // Water Air Soil Pollut. 2010. V. 208. P. 305–316.
7. Horálek J., Kurfürst P., de Smet P. et al. Spatial mapping of air quality for European scale assessment. European Topic Centre on Air and Climate Change (ACC Technical Paper 2006/6). 2007.
8. Белан Б. Д., Задде Г. О. Спектральная прозрачность и аэрозольное ослабление над территорией СССР. Издание Томского филиала СО АН СССР. Томск. 1987. 180 с.
9. Pal S., Behrendt A., Radlach M. et al. Eye-safe scanning aerosol lidar at 355 nm. In Proceedings of the 23rd International Laser Radar Conference. Japan. 2006. P. 797–800.
10. Spuler S. M., Mayor S. D. Scanning eye-safe elastic backscatter lidar at 1.54 μm . // J. Atmos. and Oceanic Technol. 2005. V. 22. P. 696–703.

11. *Itahashi S., Uno I., Yumimoto K. et al.* Interannual variation in the fine-mode MODIS aerosol optical depth and its relationship to the changes in sulfur dioxide emissions in China between 2000 and 2010 // *Atmos. Chem. and Phys.* 2012. V. 12. P. 2631–2640.
12. *Munchak L. A., Levy R. C., Mattoo S. et al.* MODIS 3 km aerosol product: applications over land in an urban/suburban region // *Atmos. Meas. Tech.* 2013. V. 6. P. 1747–1759.
13. *Ashbaugh L. L.* A statistical trajectory technique for determining air pollution source regions // *J. Air Pollut. Control. Ass.* 1983. V. 33. P. 1096–1098.
14. *Seibert P., Kromp-Kolb H., Baltensperger U. et al.* Trajectory analysis of aerosol measurements at high alpine sites // *Transport and Transformation of Pollutants in the Troposphere*. Den Haag: Academic Publ. 1994. P. 689–693.
15. *Stohl A.* Trajectory statistics – a new method to establish source-receptor relationships of air pollutants and its application to the transport of particulate sulfate in Europe // *Atmos. Environ.* 1996. V. 30. N 4. P. 579–587.
16. *Stohl A., Forster C., Frank A. et al.* Technical note: The Lagrangian particle dispersion model FLEXPART version 6.2 // *Atmos. Chem. and Phys.* 2005. V. 5. N. 4. P. 2461–2474.
17. *Riddle E. E., Voss P. B., Stohl A. et al.* Trajectory model validation using newly developed altitude-controlled balloons during the International Consortium for Atmospheric Research on Transport and Transformations 2004 campaign // *J. Geophys. Res.* 2006. V. 111. D23S57.
18. *Baumann K., Stohl A.* Validation of a long-range trajectory model using gas balloon tracks from the Gordon Bennett Cup 95 // *J. Appl. Meteorol.* 1997. V. 36. P. 711–720.
19. *Haagenson P. L., Kuo Y. H., Skumanich M., Seaman N. L.* Tracer verification of trajectory models // *J. of Climate and Appl. Meteorol.* 1987. V. 26. P. 410–426.
20. *Draxler R. R.* The accuracy of trajectories during ANATEX calculated using dynamic model analyses versus rawinsonde observations // *J. Appl. Meteorol.* 1991. V. 30. P. 1446–1467.

21. *Raynor G. S., Hayes J. V., Lewis D. M.* Testing of the Air Resources Laboratories trajectory model on cases of pollen wet deposition after long-distance transport from known source regions // *Atmos. Environ.* 1983. V.17. P. 213–220.
22. *Heffter J. L., Stunder B. J. B.* Volcanic ash forecast transport and dispersion (VAFTAD) model // *Weather and Forecasting.* 1993. V. 8. P. 533—541.
23. *Heffter J. L., Stunder B. J. B., Rolph G. D.* Long-range forecast trajectories of volcanic ash from Redoubt Volcano eruptions // *Bulletin of the American Meteorol. Society.* 1990. V. 71. P. 1731—1738.
24. *Kolb H., Seibert P., Zwatz-Meise V., Mahringer G.* Comparison of trajectories calculated during and after the Chernobyl accident. In: *Evaluation of atmospheric dispersion models applied to the release from Chernobyl // Österreichische Beiträge zu Meteorologie und Geophysik.* V. 1. P. 61—69.
25. *Stohl A., Seibert P.* Accuracy of trajectories as determined from the conservation of meteorological tracers // *Q J R Meteorol. Soc.* 1998. V. 124. P.1465–1484.
26. *Stohl A.* Computation, accuracy and applications of trajectories - a review and bibliography // *Atmos. Environ.* 1998. V. 32. № 6. P. 947–966.
27. *Агеева В. Ю., Гришаев М. В., Груздев А. Н. и др.* Аномалии стратосферного содержания NO₂ над Сибирью, связанные с арктической озоновой дырой 2011 г. // *Оптика атмосферы и океана.* 2014. Т. 27, № 01. С. 40–45.
28. *Нерода А. С., Мишуков В. Ф., Горячев В. А.* Атмосферный перенос искусственных радионуклидов в Дальневосточном регионе Азии после аварии на АЭС «Фукусима-1» // *Оптика атмосферы и океана.* 2013. Т. 26, № 09. С. 749–753.
29. *Долгий С. И., Бурлаков В. Д., Макеев А. П. и др.* Аэрозольные возмущения стратосферы после извержения вулкана Гримсвотн (Исландия, май 2011 г.) по данным наблюдений станций лидарной сети стран СНГ CIS-LiNet в Минске, Томске и Владивостоке // *Оптика атмосферы и океана.* 2013. Т. 26, № 07. С. 547–552.
30. *Букин О. А., Кульчин Ю. Н., Павлов А. Н. и др.* Характеристики структуры и динамики ППС в переходной зоне «материк–океан». Ч. I. Зимний период // *Оптика атмосферы и океана.* 2012. Т. 25, № 08. С. 694–701.

31. Павлов А. Н., Шмирко К. А., Столярчук С. Ю. Характеристики структуры и динамики ППС в переходной зоне «материк–океан». Ч. II. Летний период // Оптика атмосферы и океана. 2012. Т. 25, № 11. С. 968–975.
32. Jorba O., Perez C., Rocaadenbosch F., Baldasano J. M. Cluster analysis of 4-day back trajectories arriving in the Barcelona area, Spain, from 1997 to 2002 // J. Appl. Meteor. 2004. V. 43. № 6. P. 887–901.
33. Rozwadowska A., Zieliński T., Petelski T., Sobolewski P. Cluster analysis of the impact of air back-trajectories on aerosol optical properties at Hornsund, Spitsbergen // Atmos. Chem. Phys. 2010. V. 10. P. 877-893, doi:10.5194/acp-10-877-2010.
34. Hafner W. D., Solorazano N. N., Jaffe D. A. Analysis of rainfall and fine aerosol data using clustered trajectory analysis for National Park sites in the Western U.S. // Atmos. Environ. 2007. V. 41. P. 3071–3081.
35. Cape J. N., Methven J., Hudson L. E. The use of trajectory cluster analysis to interpret trace gas measurements at Mace Head, Ireland // Atmos. Environ. 2000. V. 34. P. 3651–3663.
36. Виноградова А. А., Веремейчик А. О. Поле потенциальных источников аэрозольного загрязнения атмосферы в районе Ненецкого заповедника // Оптика атмосферы и океана. 2012. Т. 25, № 9. С. 760–767.
37. Bressi M., Sciare J., Gherzi V. et al. Sources and geographical origins of fine aerosols in Paris (France) // Atmos. Chem. Phys. Discuss. 2013. V. 13. P. 33237–33309.
38. Hwang I., Hopke P. K. Estimation of source apportionment and potential source locations of PM_{2.5} at a west coastal IMPROVE site // Atmos. Environ. 2007. V. 41. P. 506–518.
39. Kim H. S., Huh J. B., Hopke P. K. et al. Characteristics of the major chemical constituents of PM_{2.5} and smog events in Seoul, Korea in 2003 and 2004 // Atmos. Environ. 2007. V. 41. P. 6762–6770.
40. Salvador P., Artíñano B., Pio C. A. et al. Evaluation of aerosol sources at European high altitude background sites with trajectory statistical methods // Atmos. Environ. 2010. V. 44. P. 2316–2329.

41. *Waked A., Favez O., Alleman L. Y. et al.* Source apportionment of PM₁₀ in a North-Western Europe regional urban background site (Lens, France) using Positive Matrix Factorization and including primary biogenic emissions // *Atmos. Chem. Phys. Discuss.* 2013. V. 13. P. 25325–25385.
42. *Xie Y. L.; Berkowitz C. M.* The use of conditional probability functions and potential source contribution functions to identify source regions and advection pathways of hydrocarbon emissions in Houston, Texas // *Atmos. Environ.* 2006. V. 41. № 28. P. 5831–5847.
43. *Sofowote U. M., Hung H., Rastogi A. K. et al.* Assessing the long-range transport of PAH to a sub-Arctic site using positive matrix factorization and potential source contribution function // *Atmos. Environ.* 2011. V. 45. P. 967–976.
44. *Wotawa G., Kroger H., Stohl A.* Transport of ozone towards the Alps – results from trajectory analysis and photochemical model studies // *Atmos. Environ.* 2000. V. 34. P. 1367–1377.
45. *Bonasoni P., Stohl A., Cristofanelli P. et al.* Background ozone variations at Mt. Cimone Station // *Atmos. Environ.* 2000. V. 34. P. 5183–5189.
46. *Cheng I., Zhang L., Blanchard P. et al.* Concentration-weighted trajectory approach to identifying sources of Speciated Atmospheric Mercury at an Urban Coastal Site in Nova Scotia, Canada // *Atmos. Chem. Phys.* 2013. V. 13. P. 6031–6048.
47. *Han Y. J., Holsen T. M., Hopke P. K.* Estimation of source locations of total gaseous mercury measured in New York State Using Trajectory Based Models // *Atmos. Environ.* 2007. V. 41. P. 6033–6047.
48. *Miller J. M.* The use of back air trajectories in interpreting atmospheric chemistry data: A review and bibliography (NOAA Tech. Memo. ERL ARL-155) // Silver Spring, Maryland: Air Resources Laboratory. 1987. 28 p.
49. *Наговицына Е. С., Поддубный В. А.* Использование геоинформационных технологий для анализа данных фотометрических измерений // *Геоинформатика.* 2012, №2. С. 20–28.

50. *Smirnov A., O'Neill N. T., Royer A., Tarussov A.* Aerosol optical depth over Canada and the link with synoptic air mass types // *J. Geoph. Res.* 1996. V. 101. № D14. P. 19299–19318.

51. *Наговицына Е. С., Лужецкая А. П., Поддубный В. А. и др.* Использование геоинформационных технологий для анализа данных глобальной системы мониторинга AERONET // *Материалы III конф. молодых ученых «Геоинформационные технологии и космический мониторинг».* Ростов-на-Дону: Изд-во СКНЦ-ВШ, 2010. С. 82–86.

52. *Neteler M., Mitiasova H.* Open Source GIS: A GRASS GIS Approach. Springer. 2008. 408 p.

53. *Yang Z.-L., Dickinson R. E.* Description of the Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme (BATS) for the Soil Moisture Workshop and evaluation of its performance // *Global and Planetary Change.* 1996. № 13. P. 117–134.

54. *Scheifinger H., Kaiser A.* Validation of trajectory statistical methods // *Atmos. Environ.* 2007. V. 41. № 39. P. 8846–8856.

55. *Поддубный В. А.* Гибридный Эйлера-Лагранжа метод статистики обратных траекторий для наземного зондирования атмосферы: сб. тез. // *Международ. симп. стран СНГ «Атмосферная радиация и динамика» (МСАРД-2009).* СПб, 22–26 июня 2009 г. СПб : Изд-во СПбГУ, 2009. С. 42–43.

56. *Поддубный В. А.* Метод флюид-локации атмосферы // *Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы: материалы XVI Международ. симп.* Томск : Изд-во ИОА СО РАН. 2009. С. 502–504.

57. *Поддубный В. А., Наговицына Е. С.* Методы обратных траекторий для интерпретации данных мониторинга // *Геоинформационные технологии и космический мониторинг : материалы. III конф. молодых ученых.* Ростов-на-Дону: Изд-во СКНЦ-ВШ, 2010. С. 96–100.

58. *Кабашиников В. П., Кузьмин В. Н., Петручук А. и др.* Выявление источников аэрозольного загрязнения атмосферы на основе данных дистанционного зондирования и статистики обратных траекторий // *Оптика атмосферы и океана.* 2008. Т. 21, № 1. С. 48–52.

59. *Sinnott R. W.* Virtues of the Haversine // *Sky and Telescope*. 1984. V. 68. № 2. 159 p.
60. *Dubovik O., King M.* A flexible inversion algorithm for retrieval aerosol optical properties from Sun and sky radiance measurements // *J. Geophys. Res.* 2000. V. 105. D16. P. 20673–20696.
61. *Свириденков М. А.* Определение характеристик атмосферного аэрозоля по спектральным измерениям прозрачности и малоуглового рассеяния // *Оптика атмосферы и океана*. 2001. Т. 14, № 12. С. 1115–1118.
62. *Веретенников В. В., Меньщикова С. С.* Особенности восстановления микроструктурных параметров аэрозоля из измерений аэрозольной оптической толщины. Часть I. Методика решения обратной задачи. // *Оптика атмосферы и океана*. 2013. Т. 26, № 04. С. 306–312.
63. *Сакерин С. М., Кабанов Д. М., Панченко М. В. и др.* Результаты мониторинга атмосферного аэрозоля в азиатской части России по программе AEROSIBNET в 2004 г. // *Оптика атмосферы и океана*. 2005. Т. 18, № 11. С. 968–975.
64. *Сакерин С.М., Береснев С.А., Горда С.Ю. и др.* Характеристики годового хода спектральной аэрозольной оптической толщи атмосферы в условиях Сибири // *Оптика атмосферы и океана*. 2009. Т. 22, № 6. С. 566–574.
65. *Панченко М. В., Терпугова С. А.* Годовой ход содержания субмикронного аэрозоля в тропосфере над Западной Сибирью // *Оптика атмосферы и океана*. 1994. Т. 7, № 8. С. 1022–1032.
66. *Панченко М. В., Козлов В. С., Польшкин В. В. и др.* Восстановление оптических характеристик тропосферного аэрозоля Западной Сибири на основе обобщенной эмпирической модели, учитывающей поглощающие и гигроскопические свойства частиц // *Оптика атмосферы и океана*. 2012. Т. 25, № 1. С. 46–54.
67. *Поддубный В. А., Наговицына Е. С.* Восстановление пространственного поля концентрации атмосферного аэрозоля по данным локальных измерений: модификация метода статистики обратных траекторий // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. 2013. Т. 49, № 4. С. 439–446.

68. Исследование радиационных характеристик аэрозоля в азиатской части России / под ред. С. М. Сакерина. Томск : Изд-во Института оптики атмосферы СО РАН. 2012. 484 с.

69. *Limpert E., Stahel W., Abbt M.* Log-normal Distributions across the Sciences: Keys and Clues // *BioScience*. 1998. V. 51. № 5. P. 341–352.

70. *Berthouex P., Brown L.* Statistics for Environmental Engineers. Second Ed. // Lewis Publ. 2002. 464 p.

71. *Gilbert R. O.* Statistical Methods for Environmental Pollution Monitoring // New York: Van Nostrand Reinhold. 1987. 320 p.

72. *Land C. E.* Confidence intervals for linear functions of the normal mean and variance // *Annals of Mathematical Statistics*. 1971. V. 42. P. 1187–1205.

73. *Land C. E.* Tables of confidence limits for linear functions of the normal mean and variance, in *Selected Tables in Mathematical Statistics*, vol. III // American Mathematical Society, Providence. R.I. 1975. P. 385–419.

74. *Малышкин А. В., Поддубный В. А., Маркелов Ю. И. и др.* Средний Урал в системе AEROSIBNET: предварительный анализ влияния региональных источников аэрозольного загрязнения атмосферы // *Оптика атмосферы и океана*. 2007. Т. 20, № 6. С. 497–500.

75. *Сакерин С. М., Андреев С. Ю., Бедарева Т. В. и др.* Пространственно-временная изменчивость аэрозольной оптической толщи атмосферы на территории Поволжья, Урала и Западной Сибири // *Оптика атмосферы и океана*. 2012. Т. 25, № 11. С. 958–962.

76. *Плахина И. Н., Панкратова Н. В., Махоткина Е. Л.* Вариации аэрозоля в толще атмосферы по данным российской актинометрической сети (1976–2006 гг.) // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. 2009. Т. 45, № 4. С. 489–500.

77. *Grythe H., Strom J., Krejci R. et al.* A review of sea-spray aerosol source function using global set of sea salt aerosol concentration measurements // *Atmos. Chem. and Phys.* 2014. V. 14. P. 1277–1297.

78. Сакерин С. М., Андреев С. Ю., Кабанов Д. М. и др. О результатах исследований аэрозольной оптической толщи атмосферы в арктических районах // Оптика атмосферы и океана. 2014. Т. 27, № 05. С. 413–423.
79. Petroff A., Mailliat A., Amielh M., Anselmet F. Aerosol dry deposition on vegetative canopies. Part I: Review of present knowledge // Atmos. Environ. 2008. V. 42. P. 3625–3653.
80. McMurry P. H. A review of atmospheric aerosol measurements // Atmos. Environ. 2000. V. 34. P. 1959–1999.
81. Аэрозоль и климат / под ред. К. Я. Кондратьева. Л. : Гидрометеиздат, 1991. 541 с.
82. Гущин Г. П. Методы, приборы и результаты спектральной прозрачности атмосферы. Л. : Гидрометеиздат, 1988. 200 с.
83. Sehmel G. A. Particle and gas dry deposition: a review // Atmos. Environ. 1980. V. 14. P. 983–1011.
84. Legg B. J., Powell F. A. Spore dispersal in barley crop: a mathematical model // Agricultural Meteorology. 1979. V. 20. P. 47–67.
85. Aylor D. E. Modeling spore liberated in a Barley crop // Agricultural Meteorology. 1982. V. 26. P. 215–219.
86. Davidson C. I., Miller J. M., Pleskow M. A. The influence of surface structure on predicted particle dry deposition to natural grass canopies // Water, Air and Soil Pollution. 1982. V. 18. P. 25–44.
87. Wiman B. L. B., Agren G. I. Aerosol depletion and deposition in forests—a model analysis. // Atmos. Environ. 1985. V. 19. P. 335–347.
88. Peters K., Eiden R. Modelling the dry deposition velocity of aerosol particles to a spruce forest // Atmos. Environ. 1992. V. 26A. P. 2555–2564.
89. Slinn W. G. N. Prediction for particle deposition to vegetative canopies // Atmos. Environ. 1982. V. 16. P. 1785–1794.
90. Zhang L., Gong S., Padro J., Barrie L. A size-segregated particle dry deposition scheme for an atmospheric aerosol module // Atmos. Environ. 2001. V. 35. P. 549–560.

91. *Chamberlain A. C., Chadwick R. C.* Deposition of airborne radio-iodine vapor // *Nucleonics*. 1953. V. 8. P. 22–25.
92. *Wesley M. L., Hicks B. B.* Some Factors that Affect the Deposition Rates of Sulfur Dioxide and Similar Gases on Vegetation // *J. of Air Pollution Control Association*. 1977. V. 27. № 11. P. 1110-1116.
93. *Seinfeld J. H., Pandis S. N.* Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change. New York : John Wiley Press. 2006. 1248 p.
94. *Slinn W.G.N.* Prediction for particle deposition to vegetative canopies // *Atmos. Environ.* 1982. V. 16. P. 1785–1794.
95. *Jacobson M. Z.* Fundamentals of Atmospheric Modeling (2nd Ed). Cambridge University Press. 2005. 813 p.
96. *Cunningham E.* On the velocity of steady fall of spherical particles through fluid medium // *Proceedings of the Royal Society of London Series A*. 1910. V. 83. P. 357–365.
97. *Бызова Н. Л., Иванов В. Н., Гаргер Е. К.* Турбулентность в пограничном слое атмосферы. Л. : Гидрометеиздат, 1989. 263 с.
98. *Businger J. A., Wynagaard J. C., Izumi Y., Bradley E. F.* Flux-profile relationships in the atmospheric surface layer // *J. Atmos. Sci.* 1971. V. 28. P. 181–189.
99. *Paulson C. A.* The mathematical representation of wind speed and temperature profiles in the unstable surface layer // *J. Appl. Meteor.* 1970. V. 9. P. 857–861.
100. *Hogstrom U.* Non-dimensional wind and temperature profiles in the atmospheric surface layer: a re-evaluation // *Bound. Lay. Meteorol.* 1988. V. 42. P. 55–78.
101. *Dyer A. J.* A review of flux-profile relationships // *Bound. Lay. Meteorol.* 1974. V. 7. P. 363–372.
102. *Hicks B. B.* Wind profile relationships from the «Wangara» experiment // *Quarterly J. of the Royal Meteorol Society*. 1976. V. 102. P. 535–551.
103. *Holtslag A. A. M., De Bruin H. A. R.* Applied modelling of the nighttime surface energy balance over land // *J. Appl. Meteor.* 1988. V. 27. P. 689–704.

104. *Louis J. F.* A parametric model of vertical eddy fluxes in the atmosphere // *Bound. Lay. Meteorol.* 1979. V. 17. P. 187–202.
105. *Монин А. С., Обухов А. Н.* Основные закономерности турбулентного перемешивания в приземном слое атмосферы. // *Труды Геофизического института АН СССР.* 1954. №24(151). С.163–187.
106. *Davidson C. I., Miller J. M., Pleskow M. A.* The Influence of Surface Structure on Predicted Particle Dry Deposition to Natural Grass Canopies // *Water, Air, and Soil Pollution.* 1982. V. 18. P. 25–44.
107. *Wiman B. L. B., Agren G. I.* Aerosol depletion and deposition in forest – a model analysis // *Atmos. Environ.* 1985. V. 19. P. 335–347.
108. *Incropera F. P., DeWitt D. P.* Fundamentals of Heat and Mass Transfer (3rd Ed.). New York : Wiley, 1990. P. 345.
109. *Ивлев Л. С., Довгало Ю. А.* Физика атмосферных аэрозольных систем. СПб. : НИИХ СПбГУ, 1999. 194 с.
110. *Giorgi F.* Dry deposition velocities of atmospheric aerosols as inferred by applying a particle dry deposition parametrization to a general circulation model. *Tellus.* 1988. V. 40B. P. 23–41.
111. *Giorgi F.* A particle dry-deposition parameterization scheme for use in tracer transport models // *J. Geophys. Res.* 1986. V. 91. P. 9794–9806.
112. *Ветошкин А. Г.* Теоретические основы защиты окружающей среды. учеб. пособие. Пенза : Изд-во ПГАСА. 2002. 290 с.
113. *Gerber H.* Relative-humidity parameterization of the Navy aerosol model // *National Research Laboratory, NRL Report 8956.* 1985. P. 13.
114. *Lamaud E., Brunet Y., Labatut A. et al.* The Landes Experiment: biosphere–atmosphere exchanges of ozone and aerosol particles above a pine forest // *J. Geophys. Res.* 1994. V. 99. P. 16511–16521.
115. *Beswick K.M., Hargreaves K.L., Gallagher M.W. et al.* Size-resolved measurements of cloud droplet deposition velocity to a canopy using an eddy correlation technique // *Quarterly J. of the Royal Meteorol. Society.* 1991. V. 117. P. 623–645.

116. *Gronholm T., Aalto P., Hiltunen V. et al.* Measurements of aerosol particle dry deposition velocity using the relaxed eddy accumulation technique // *Tellus*. 2007. V. 59B. P. 381–386.
117. *Waraghai A., Gravenhorst G.* Dry deposition of atmospheric particles to an old spruce stand. In: *Georgii, H.-W.(Ed.), Mechanisms and Effects of Pollutant-Transfer into Forests* // Kluwer Academic Publishers, Dordrecht. 1989. P. 77–86.
118. *Nemitz E., Gallagher M. W., Duyzer J. H., Fowler D.* Micrometeorological measurements of particle deposition velocities to moorland vegetation // *Quarterly J. of the Royal Meteorol. Society*. 2002. V. 128. P. 2281–2300.
119. *Chamberlain A. C.* Transport of lycopodium spores and other small particles to rough surfaces // *Proceedings of the Royal Society London*. 1967. V. 296. P. 45–70.
120. *Gallagher W. M., Choularton T. W., Morse A. P., Fowler D.* Measurements of the size dependence of cloud droplet deposition at a hill site // *Quarterly J. of the Royal Meteorol. Society*. 1988. V. 114. P. 1291–1303.
121. *Stohl A., Wotawa G., Seibert P., Kromp-Kolb H.* Interpolation errors in wind fields as a function of spatial and temporal resolution and their impact on different types of kinematic trajectories // *J. Appl. Meteor.* 1995. V. 34. P. 2149–2165.
122. *Панченко М. В., Козлов В. С., Польшкин В. В. и др.* Восстановление оптических характеристик тропосферного аэрозоля Западной Сибири на основе обобщенной эмпирической модели, учитывающей поглощающие и гигроскопические свойства частиц // *Оптика атмосферы и океана*. 2012. Т. 25, № 1. С. 46–54.
123. *Galati S. R.* *Geographic Information Systems Demystified*. Artech House Inc. 2006. 270 p.

Приложение А

(справочное)

Таблица А.1. Значения $H_{1-\alpha} = H_{0.95}$ для расчета одностороннего верхнего 95% доверительного интервала среднего значения выборки, имеющей логнормальное распределение

s_{Ln}^*	N									
	3	5	7	10	12	15	21	31	51	101
0.1	2.75	2.035	1.886	1.802	1.775	1.749	1.722	1.701	1.684	1.67
0.2	3.295	2.198	1.992	1.881	1.843	1.809	1.771	1.742	1.718	1.697
0.3	4.109	2.402	2.125	1.977	1.927	1.882	1.833	1.793	1.761	1.733
0.4	5.22	2.651	2.282	2.089	2.026	1.968	1.905	1.856	1.813	1.777
0.5	6.495	2.947	2.465	2.22	2.141	2.068	1.989	1.928	1.876	1.83
0.6	7.807	3.287	2.673	2.368	2.271	2.181	2.085	2.01	1.946	1.891
0.7	9.12	3.662	2.904	2.532	2.414	2.306	2.191	2.102	2.025	1.96
0.8	10.43	4.062	3.155	2.71	2.57	2.443	2.307	2.202	2.112	2.035
0.9	11.74	4.478	3.42	2.902	2.738	2.589	2.432	2.31	2.206	2.117
1	13.05	4.905	3.698	3.103	2.915	2.744	2.564	2.423	2.306	2.205
1.25	16.33	6.001	4.426	3.639	3.389	3.163	2.923	2.737	2.58	2.447
1.5	19.6	7.12	5.184	4.207	3.896	3.612	3.311	3.077	2.881	2.713
1.75	22.87	8.25	5.96	4.795	4.422	4.081	3.719	3.437	3.2	2.997
2	26.14	9.387	6.747	5.396	4.962	4.564	4.141	3.812	3.533	3.295
2.5	32.69	11.67	8.339	6.621	6.067	5.557	5.013	4.588	4.228	3.92
3	39.23	13.97	9.945	7.864	7.191	6.57	5.907	5.388	4.947	4.569
3.5	45.77	16.27	11.56	9.118	8.326	7.596	6.815	6.201	5.681	5.233
4	52.31	18.58	13.18	10.38	9.469	8.63	7.731	7.024	6.424	5.908
4.5	58.85	20.88	14.8	11.64	10.62	9.669	8.652	7.854	7.174	6.59
5	65.39	23.19	16.43	12.91	11.77	10.71	9.579	8.688	7.929	7.277
6	78.47	27.81	19.68	15.45	14.08	12.81	11.44	10.36	9.449	8.661
7	91.55	32.43	22.94	18	16.39	14.9	13.31	12.05	10.98	10.05
8	104.6	37.06	26.2	20.55	18.71	17.01	15.18	13.74	12.51	11.45
9	117.7	41.68	29.46	23.1	21.03	19.11	17.05	15.43	14.05	12.85
10	130.8	46.31	32.73	25.66	23.35	21.22	18.93	17.13	15.59	14.26

Таблица А.2. Значения $H_\alpha = H_{0.05}$ для расчета одностороннего нижнего 5% доверительного интервала среднего значения выборки, имеющей логнормальное распределение

s_{Ln}^*	N									
	3	5	7	10	12	15	21	31	51	101
0.1	-2.13	-1.806	-1.731	-1.69	-1.677	-1.666	-1.655	-1.648	-1.644	-1.642
0.2	-1.949	-1.729	-1.678	-1.653	-1.646	-1.64	-1.636	-1.636	-1.637	-1.641
0.3	-0.816	-1.669	-1.639	-1.627	-1.625	-1.625	-1.627	-1.632	-1.638	-1.648
0.4	-1.717	-1.625	-1.611	-1.611	-1.613	-1.617	-1.625	-1.635	-1.647	-1.662
0.5	-1.644	-1.594	-1.594	-1.603	-1.609	-1.618	-1.631	-1.646	-1.663	-1.683
0.6	-1.589	-1.573	-1.584	-1.602	-1.612	-1.625	-1.643	-1.662	-1.685	-1.711
0.7	-1.549	-1.56	-1.582	-1.608	-1.622	-1.638	-1.661	-1.686	-1.713	-1.744
0.8	-1.521	-1.555	-1.586	-1.62	-1.636	-1.656	-1.685	-1.714	-1.747	-1.783
0.9	-1.502	-1.556	-1.595	-1.637	-1.656	-1.68	-1.713	-1.747	-1.785	-1.826
1	-1.49	-1.562	-1.61	-1.658	-1.681	-1.707	-1.745	-1.784	-1.827	-1.874
1.25	-1.486	-1.596	-1.662	-1.727	-1.758	-1.793	-1.842	-1.893	-1.949	-2.012
1.5	-1.508	-1.65	-1.733	-1.814	-1.853	-1.896	-1.958	-2.02	-2.091	-2.169
1.75	-1.547	-1.719	-1.819	-1.916	-1.962	-2.015	-2.088	-2.164	-2.247	-2.341
2	-1.598	-1.799	-1.917	-2.029	-2.083	-2.144	-2.23	-2.318	-2.416	-2.526
2.5	-1.727	-1.986	-2.138	-2.283	-2.351	-2.43	-2.54	-2.654	-2.78	-2.921
3	-1.88	-2.199	-2.384	-2.56	-2.644	-2.74	-2.874	-3.014	-3.169	-3.342
3.5	-2.051	-2.429	-2.647	-2.855	-2.953	-3.067	-3.226	-3.391	-3.574	-3.78
4	-2.237	-2.672	-2.922	-3.161	-3.275	-3.406	-3.589	-3.779	-3.99	-4.228
4.5	-2.434	-2.924	-3.206	-3.476	-3.605	-3.753	-3.96	-4.176	-4.416	-4.685
5	-2.638	-3.183	-3.497	-3.798	-3.941	-4.107	-4.338	-4.579	-4.847	-5.148
6	-3.062	-3.715	-4.092	-4.455	-4.627	-4.827	-5.106	-5.397	-5.721	-6.086
7	-3.499	-4.26	-4.699	-5.123	-5.325	-5.559	-5.886	-6.227	-6.608	-7.036
8	-3.945	-4.812	-5.315	-5.8	-6.031	-6.3	-6.674	-7.066	-7.502	-7.992
9	-4.397	-5.371	-5.936	-6.482	-6.742	-7.045	-7.468	-7.909	-8.401	-8.953
10	-4.852	-5.933	-6.56	-7.168	-7.458	-7.794	-8.264	-8.755	-9.302	-9.918

Приложение Б

(справочное)

Таблица Б.1. Классы подстилающего ландшафта (КПЛ) и категории сезонов (КС)
в модели Занга для сухого осаждения

Категория	Описание
Классы подстилающего ландшафта (КПЛ)	
1	Вечнозеленые хвойные леса
2	Вечнозеленые широколиственные леса
3	Опадающие хвойные леса
4	Опадающие широколиственные леса
5	Смешанный лес
6	Луга
7	Сельскохозяйственные поля
8	Пустыни
9	Тундра
10	Кустарники и редколесье
11	Увлажненные почвы с растительностью
12	Ледники
13	Внутренние воды
14	Океан
15	Урбанизированные территории
Категории сезонов (КС)	
1	Разгар лета с буйной растительностью
2	Ранняя осень
3	Поздняя осень после заморозков, без снега
4	Зима, снежный покров
5	Весна

Таблица Б.2. Параметры для 15 классов подстилающего ландшафта (КПЛ) и
5 категорий сезонов (КС)

КПЛ		1	2	3	4	5	6	7	8
z_0 (м)	КС1	0.8	2.65	0.85	1.05	1.15	0.1	0.1	0.04
	КС2	0.9	2.65	0.85	1.05	1.15	0.1	0.1	0.04
	КС3	0.9	2.65	0.80	0.95	1.15	0.05	0.02	0.04
	КС4	0.9	2.65	0.55	0.95	1.15	0.02	0.02	0.04
	КС5	0.8	2.65	0.60	0.75	1.15	0.05	0.05	0.04
A_e (мм)	КС1	2.0	5.0	2.0	5.0	5.0	2.0	2.0	na
	КС2	2.0	5.0	2.0	5.0	5.0	2.0	2.0	na
	КС3	2.0	5.0	5.0	10.0	5.0	5.0	5.0	na
	КС4	2.0	5.0	5.0	10.0	5.0	5.0	5.0	na
	КС5	2.0	5.0	2.0	5.0	5.0	2.0	2.0	na
α		1.0	0.6	1.1	0.8	0.8	1.2	1.2	50.0
γ		0.56	0.58	0.56	0.56	0.56	0.54	0.54	0.54

Таблица Б.2. Параметры для 15 классов подстилающего ландшафта (КПЛ) и 5 категорий сезонов (КС) (продолжение)

КПЛ		9	10	11	12	13	14	15
z_0 (м)	КС1	0.03	0.1	0.03	0.01	f(u)	f(u)	1.0
	КС2	0.03	0.1	0.03	0.01	f(u)	f(u)	1.0
	КС3	0.03	0.1	0.03	0.01	f(u)	f(u)	1.0
	КС4	0.03	0.1	0.03	0.01	f(u)	f(u)	1.0
	КС5	0.03	0.1	0.03	0.01	f(u)	f(u)	1.0
A (мм)	КС1	на	10.0	10.0	на	на	на	10.0
	КС2	на	10.0	10.0	на	на	на	10.0
	КС3	на	10.0	10.0	на	на	на	10.0
	КС4	на	10.0	10.0	на	на	на	10.0
	КС5	на	10.0	10.0	на	на	на	10.0
α		50.0	1.3	2.0	50.0	100	100	1.5
γ		0.54	0.54	0.54	0.54	0.50	0.50	0.56

Примечание. f(u) – функция от скорости ветра (u); на – параметр не определяется для данного типа ландшафта.