

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

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки
Институте промышленной экологии Уральского отделения Российской академии наук

Научный руководитель: **Поддубный Василий Алексеевич**
кандидат физико-математических наук, ведущий научный
сотрудник

Официальные оппоненты: **Рапута Владимир Федотович**
доктор физико-математических наук, Институт
вычислительной математики и математической геофизики
СО РАН, г. Новосибирск

Хуторова Ольга Германовна
доктор физико-математических наук, профессор, Казанский
(Приволжский) федеральный университет, г. Казань

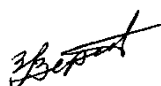
Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего профессионального образования
«Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б.Н. Ельцина»

Защита состоится 23 октября 2015 г. в 16 ч. 00 мин. на заседании диссертационного совета
Д 003.029.01 в Институте оптики атмосферы им. Зueva СО РАН по адресу: 634021, г.
Томск, пл. Академика Зueva, 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Института оптики
атмосферы им. Зueva СО РАН, <http://www.iao.ru/ru/theses>

Автореферат разослан « » сентября 2015 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор физико-математических наук



Веретенников В.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность

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 загрязняющих компонентов в атмосфере – важные этапы в решении самых разнообразных задач физики атмосферы. Существует целый ряд подходов для оценки полей загрязнения воздуха, один из которых основан на совместном анализе результатов измерений в одном или нескольких пунктах мониторинга и информации о динамике атмосферы, и используется в методах статистики обратных траекторий (COT). В диссертационной 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, 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:

1. 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.
2. Впервые с использованием метода ФЛА на основе данных фотометрических измерений на шести российских станциях мониторинга сети AERONET восстановлено квазидвумерное среднее поле тонкодисперсного аэрозоля.
3. 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.
4. 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.

5. 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:

1. 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.
2. 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.
3. Методика, предложенная в диссертационной работе, позволяет выполнять оценки погрешностей статистического усреднения концентраций в методах СОТ, в предположении справедливости логнормального распределения измеренных концентраций примеси.
4. 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 баз метеорологических 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

Материалы диссертационной работы опубликованы в научных изданиях, в том числе: в журналах из списка, рекомендованного ВАК (4 публикации); одна глава в коллективной монографии издательства Института оптики атмосферы СО РАН; в трудах международных и российских конференций; в проектных отчетах.

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.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении сформулирована тема исследования, отражена ее актуальность, показаны научная новизна и практическая значимость работы. Также формулируются цели, задачи и защищаемые положения диссертационной работы.

Первая глава посвящена обзору методов, использующих обратные траектории для интерпретации результатов мониторинга и при решении задач в самых разных областях физики атмосферы.

В качестве простейшего метода, использующего информацию о динамике атмосферы, рассмотрен метод климатологии потоков (*«flow climatology»*) (Miller, 1987), использование которого позволило ответить на вопрос о величине потоков и преобладающих направлениях переноса аэрозоля в различных географических зонах России.

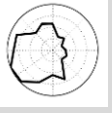
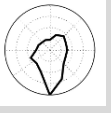
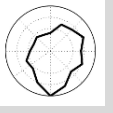
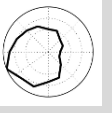
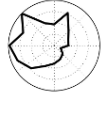
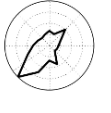
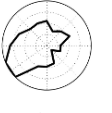
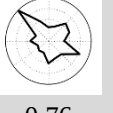
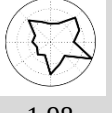
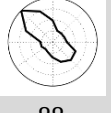
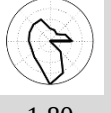
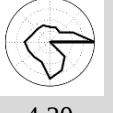
Для выявления связи уровней измеренных концентраций аэрозоля с направлениями ветра анализировалась информация результатов фотометрических измерений в тех регионах России, в которых расположены станции мониторинга глобальной сети AERONET. В регионе Центральной России размещены станции мониторинга Звенигород, Москва; на Среднем Урале – станция Екатеринбург; в Западной Сибири – станция Томск; на Дальнем Востоке – станция Уссурийск; в Якутии – станция Якутск.

Для периода проведения измерений с 2004 по 2010 г. вычислялись среднедневные объемные концентрации аэрозольных частиц. Далее полученные значения нормировались на медианное значение среднедневных концентраций аэрозоля в столбе атмосферы, рассчитанное по данным измерений в Екатеринбурге ($0.045 \text{ мкм}^3/\text{мкм}^2$).

В табл. 1 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. Максимальные значения для каждой величины и каждой станции мониторинга указаны в таблице. 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.

Как видно из табл. 1, 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.

Таблица 1 – Угловые диаграммы: а) нормированных плотностей потоков аэрозоля; б) объемных концентраций аэрозоля; в) направлений прихода воздушных потоков

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

Более сложный подход к анализу обратных траекторий движения воздуха позволяет ответить на вопрос о существовании зависимости аэрозольных концентраций в атмосфере от типов ландшафта, над которыми проходили воздушные потоки.

Разработанный в диссертации алгоритм на основе геоинформационной системы (ГИС) с открытым исходным кодом GRASS (<http://grass.osgeo.org>), позволяет определять времена пребывания траекторий движения воздушных частиц над тем или иным типом ландшафта.

Анализ проводится путем разбиения всего множества траекторий на пары выборок: группу, проходившую над анализируемым типом ландшафта и группу, не проходившую над этим ландшафтом. Основные статистические характеристики АОТ для каждой пары выборок приведены в табл. 2.

Таблица 2 – 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 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 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

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. 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 – $\alpha=0.001$.

Вторая глава посвящена описанию нового метода совместного анализа результатов измерений и информации о динамике атмосферы – метода флюида-локации атмосферы (ФЛА) и решению упрощенной задачи определения квазидвумерного среднего поля концентрации аэрозоля.

Метод флюид-локации атмосферы (ФЛА) является модификацией методов статистики обратных траекторий (Ashbaugh L.L., 1983; Seibert et al., 1994; Stohl, 1996). Разработка метода ФЛА проводилась с целью заменить интуитивные процедуры сглаживания и фильтрации, используемые в классических методах СОТ, итерационным решением уравнений переноса примеси в атмосфере. Описываются три этапа в алгоритме метода ФЛА.

1. *Этап статистической оценки среднего эффективного поля концентрации.* На данном этапе проводится оценка *среднего эффективного поля* измеряемого признака (например, концентрации загрязняющего вещества) по формуле:

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

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).

2. *Этап Эйлера.* На основе среднего поля концентраций и поля скоростей движения воздуха оценивается поле мощностей источников/стоков. Для этого используется уравнение сохранения анализируемого признака φ в эйлеровом представлении:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + \nabla \cdot (\varphi \vec{v}) = J_\varphi, \quad (2)$$

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) для ячейки конечного объема выглядит следующим образом:

$$\frac{\partial \langle \varphi \rangle}{\partial t} + \frac{1}{V} \oint_S (\varphi \vec{v}) d\vec{S} = \langle J_\varphi \rangle, \quad (3)$$

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.

Считая среднее эффективное поле, найденное на первом этапе, оценкой пространственного распределения средней за период измерений концентрации, и используя (3), 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.

3. *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:

$$\frac{d \varphi(\vec{r}(t))}{dt} = J_{\varphi}(\vec{r}(t)). \quad (4)$$

Численное решение уравнения (4) 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.

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.

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

1. формирование множества результатов измерений за достаточно большой промежуток времени, обеспечивающий максимально возможное разнообразие метеорологических ситуаций в пункте (пунктах) наблюдений;
2. расчет множества обратных траекторий движения лагранжевых воздушных частиц, прибывающих в точку расположения прибора (приборов) в моменты проведения измерений;
3. 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).

Для демонстрации возможностей метода ФЛА 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>. 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.

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.

На рис. 1 приведено среднее поле концентрации тонкодисперсного аэрозоля в зоне моделирования шести российских станций мониторинга сети AERONET. Область, представленная различными оттенками серого цвета, 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. 1 соответствует величине средней концентрации по всем рассмотренным пунктам мониторинга, а изолинии уровня 1.6 – верхнему третьему квартилю множества результатов измерений на всех станциях мониторинга.

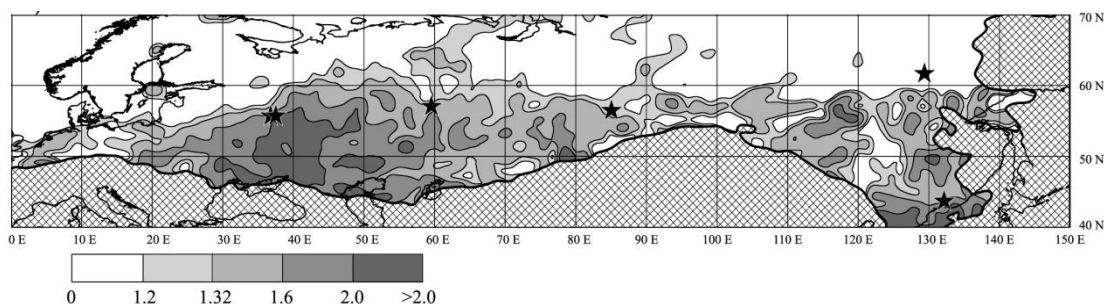


Рис. 1 – Среднее поле нормированной среднесуточной объемной концентрации тонкодисперсного аэрозоля, полученное методом ФЛА для всей области моделирования

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. При этом северные части Европы, Западной, Восточной Сибири и Дальнего Востока в основном имеют существенно более низкие значения концентрации аэрозоля.

Третья глава посвящена верификации результатов моделирования средних полей концентраций аэрозоля, рассчитанных методом 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 ходе моделирования методом ФЛА рассчитывалось пространственное распределение величины, определяемой формулой (1). Следует особо 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 (1) величина φ_l , или в разностной форме φ_{k_l} , есть неизвестная функция, которая находится в результате решения задачи методом ФЛА.

К возникновению погрешностей при оценке средних значений концентраций приводит переход в формуле (1) от интеграла по времени к расчету конечной суммы. В то время как интеграл в левой части формулы (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 (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 (1) будут различными. По мере удаления от пунктов мониторинга, т.е. точек старта обратных траекторий, плотность числа траекторий уменьшается, а погрешности расчета средних величин возрастают. Таким образом, рассматриваются погрешности, обусловленные различным числом траекторий движения воздушных частиц в различных расчетных ячейках.

На рис. 2 а показано поле распределения плотности числа обратных семисуточных траекторий движения воздушных частиц за период с 2004 по 2010 г. для шести станций мониторинга сети AERONET на территории России. Область пространства, обозначенная двойной штриховкой, соответствует 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. 2 б показаны области, в которых относительная погрешность оценки медианы концентрации аэрозоля,

рассчитанная с помощью формулы (1), не превышает 10, 20 и 30%. Двойной штриховкой выделена область пространства, в которой плотность числа траекторий на расчетную ячейку $n_{tr} \leq 3$. Жирной обозначена изолиния, территории внутри которой характеризуются плотностью траекторий на расчетную ячейку $n_{tr} \geq 10$. Из рис. 2 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. 2 в показано пространственное распределение относительных погрешностей средних арифметических значений концентраций. 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%.

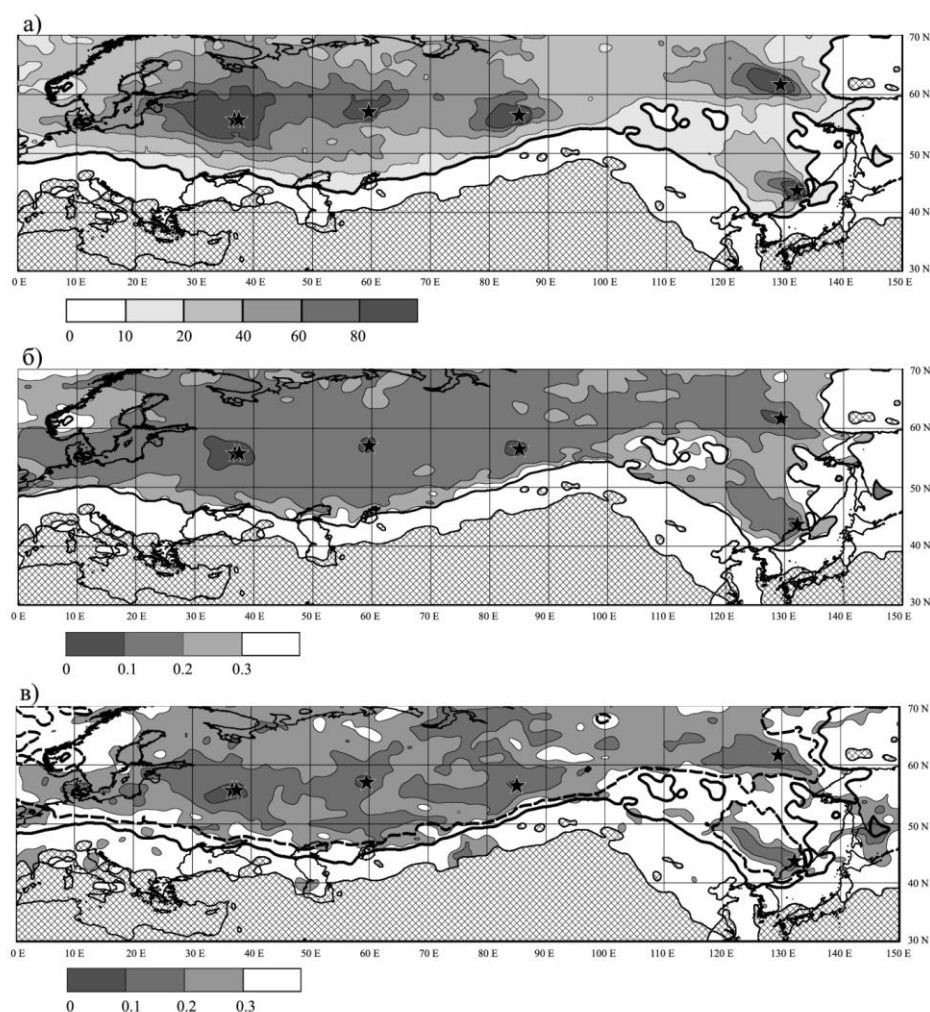


Рис. 2 – Область моделирования: а) пространственное распределение плотности числа обратных траекторий; б) пространственное распределение относительных погрешностей медианного значения концентрации; в) пространственное распределение относительных погрешностей средних арифметических значений концентраций.

В диссертационной работе рассматриваются способы верификации метода ФЛА, среди которых:

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 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.

На рис. 3 а приведено нормированное среднее эффективное поле концентраций тонкодисперсного аэрозоля в столбе воздуха, рассчитанное методом ФЛА. На рис. 3 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.

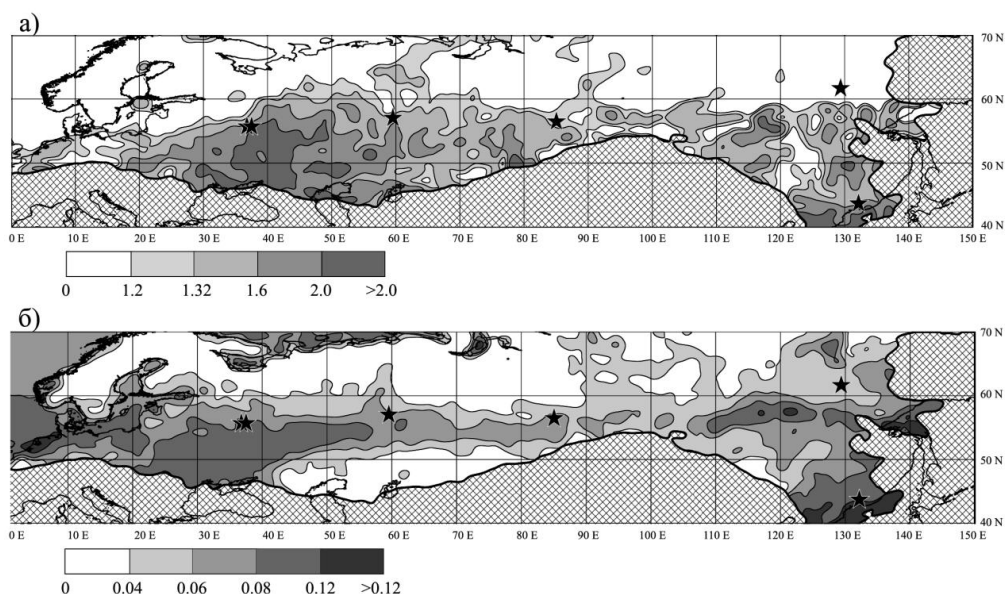


Рис. 3 – а) Среднее эффективное поле нормированной объемной концентрации тонкодисперсной фракции аэрозоля, рассчитанное методом ФЛА; б) среднее поле АОТ тонкодисперсной фракции аэрозоля по измерениям MODIS

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.

В четвертой главе диссертации представлена реализация метода ФЛА для моделирования трехмерной структуры пространственных полей аэрозольного загрязнения атмосферы, для чего потребовалось 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.

При разработке физико-математической модификации метода ФЛА, учитывающей вертикальный перенос аэрозольных частиц к поверхности, используется модель сухого осаждения Занга (Zhang et al., 2001), которая применима для частиц во всем диапазоне размеров, а так же не ограничена определенными типами подстилающей поверхности.

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.

На рис. 4 представлен характерный вид зависимости скорости сухого осаждения от размера частиц. Расчет проводился для следующих условий: тип подстилающей поверхности – трава; летний период; нейтральная стратификация атмосферы; скорость трения $u_* = 0.5 \text{ м/с}$; высота, на которой определялась скорость осаждения $z_r = 10 \text{ м}$; плотность осаждающихся частиц $\rho_p = 2.0 \text{ г/см}^3$ (плотность сажевых частиц). На рисунке также показаны скорости, обусловленные отдельными процессами осаждения, при отсутствии всех других. Видно, что сухое осаждение малых частиц ($d_p < 1 \text{ мкм}$) 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.

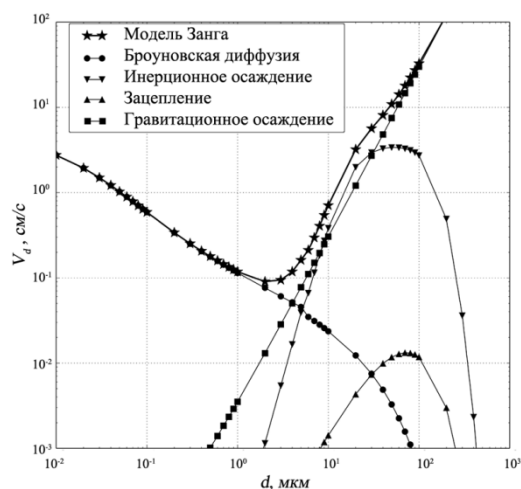


Рис. 4 – Скорости сухого осаждения частиц, рассчитанные по модели Занга

Расчеты трехмерного поля концентраций тонкодисперсного аэрозоля на Среднем Урале проводились внутри области ($50^\circ\text{--}70^\circ$) в. д. и ($50^\circ\text{--}70^\circ$) 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. 5 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 ($10.7 \cdot 10^{-12}$ 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.

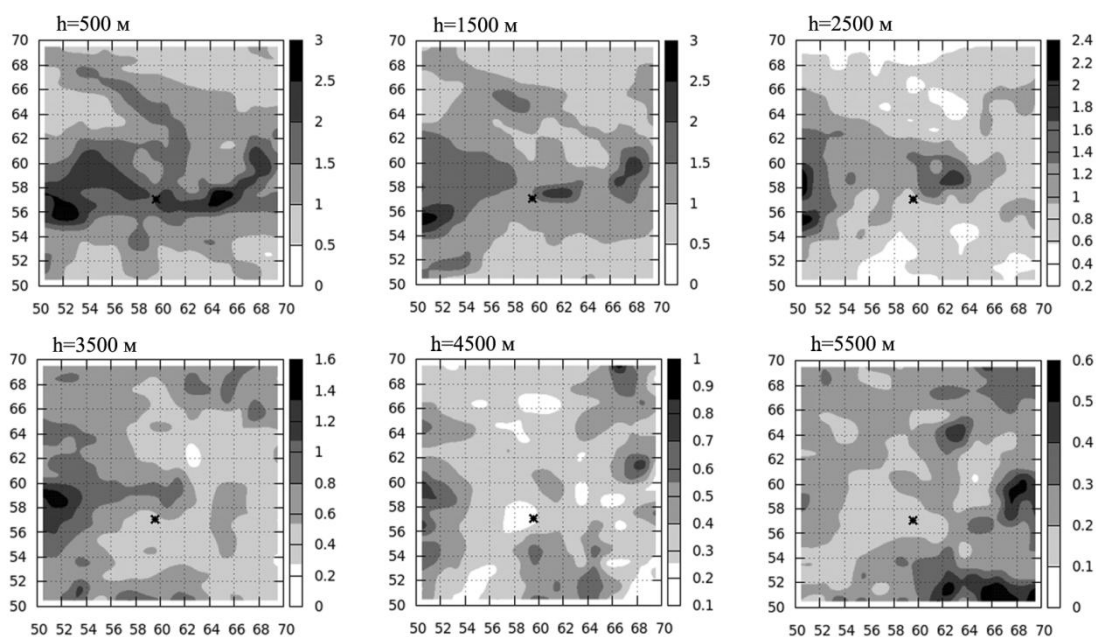


Рис. 5 – Средние поля концентраций тонкодисперсного аэрозоля на разных высотах от 500 до 5500 м на Среднем Урале

Таким образом, четвертая глава диссертации демонстрирует возможность использования метода ФЛА для моделирования трехмерных средних полей концентраций атмосферного аэрозоля.

В **заключении** сформулированы основные результаты диссертационной работы.

1. На основе результатов фотометрических измерений сети AERONET, выполнена оценка потоков атмосферного аэрозоля в различных географических регионах России за период с 2004 по 2010 г. 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).

2. 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).
3. Представлено описание нового метода совместного анализа результатов измерений параметров загрязнения воздуха 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.
4. Методом ФЛА проведена оценка квазидвумерного 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 гг. и семисуточные обратные траектории движения воздушных частиц на высоте 950 ГПа.
5. Статистическое усреднение концентраций в расчетных ячейках пространства является одним из основных этапов метода ФЛА. Расчет погрешностей такого усреднения позволяет утверждать, что метод ФЛА позволяет получать 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 %).
6. 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.

7. 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.
8. 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.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ*

Статьи, опубликованные в ведущих рецензируемых научных журналах, определенных ВАК:

- 1) **Наговицына Е.С.**, Поддубный В.А. Использование геоинформационных технологий для анализа данных фотометрических измерений. // Геоинформатика. 2012. №2. С. 20-28.
- 2) Поддубный В.А., Сакерин С.М., Лужецкая А.П., **Наговицына Е.С.**, Береснев С.А., Маркелов Ю.И. Исследование атмосферного аэрозоля на Среднем Урале методами спектральной солнечной фотометрии. // Вестник УрО РАН: Наука. Общество. Человек. 2013. №2. С. 37-53.
- 3) 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. №4. С. 439-446.
- 4) Поддубный В.А., **Наговицына Е.С.** Оценка погрешностей и верификация метода флюид-локации атмосферы. // Оптика атмосферы и океана. 2014. Т. 27. № 10. С. 869–877.

Публикации в прочих изданиях:

- 5) Поддубный В.А., **Наговицына Е.С.**, Маркелов Ю.И., Береснев С.А., Горда С.Ю., Лужецкая А.П., Захаров В.И., Грибанов К.Г., Рокотян Н.В. Глава 3. стр. 180-254, «Исследование характеристик аэрозоля и некоторых парниковых газов по данным спектральных наблюдений атмосферы на Среднем Урале», в коллективной монографии: «Исследование радиационных характеристик аэрозоля в азиатской части России» // Под общей ред. С.М. Сакерина. – Томск: Изд-во Института оптики атмосферы СО РАН. 2012. 484 с.

*Девичья фамилия Дубинкиной Е.С. – Наговицына