

На правах рукописи



Рязанов Валерий Игоревич

Исследование распространения примесей в атмосфере при работе ракетных двигателей с учетом фактических метеопараметров

Специальность 25.00.30 – Метеорология, климатология,
агрометеорология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Нальчик–2021

Работа выполнена в лаборатории математического моделирования
ФГБУ «Высокогорный геофизический институт» Федеральной службы по
метеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет)

Научный руководитель: **Шаповалов Александр Васильевич**
доктор физико-математических наук,
профессор, ФГБУ «Высокогорный
геофизический институт», г. Нальчик

Официальные оппоненты: **Колосков Борис Павлович**, доктор
физико-математических наук, АНО
«Агентство атмосферных технологий»,
г. Москва

Шхануков-Лафишев Мухамед
Хабалович, доктор физико-
математических наук, профессор, ФБГНУ
«Институт информатики и проблем
регионального управления Кабардино-
Балкарского научного центра РАН»,
г. Нальчик

Ведущая организация: ФГБУ «Научно-производственное
объединение «Тайфун», г. Обнинск

Защита состоится «09» апреля 2021 г. в 13:00 часов на заседании
диссертационного совета Д.327.001.01 при ФГБУ «Высокогорный
геофизический институт» Росгидромета по адресу: 360030, КБР, г. Нальчик,
пр. Ленина, 2, электронная почта: vgikbr@yandex.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБУ
«Высокогорный геофизический институт» и на сайте <http://vgistikhiya.ru>

Автореферат разослан «___» _____ 2021 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор географических наук, доцент



Н.В. Кондратьева

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования.

Влияние на окружающую среду (ОС) в результате ракетно-космической деятельности (РКД) возрастает, это объясняется развитием космической отрасли, увеличением числа пусков ракетносителей (РН), возрастающей мощностью ракетных двигателей. Большая масса, высокая энергетика, значительные запасы токсичных компонентов ракетного топлива делают современные и перспективные ракетносители интенсивными источниками загрязнения атмосферы, которые наносят вред приземной и верхней атмосфере, создают реальную угрозу для людей и окружающей природной среды (ОПС), особенно в районах запуска, в районах падения отделяющихся частей РН, а также при авариях, ликвидации и утилизации ракет. Опасность представляет распространение вредных примесей в атмосфере с последующим их осаждением.

Вещества, выбрасываемые в процессе заправки и подготовки к пуску ракетносителей, работы ракетных двигателей различных ступеней являются токсичными для растительного, животного мира и человека. Система управления и регулирования режимов работы двигательных установок (на жидком или твердом топливах) устроена так, что допускает выбросы загрязняющих веществ (ЗВ) в атмосферу в концентрациях много превышающих предельно-допустимые уровни, установленные нормативными документами.

В связи с этим возникает необходимость в анализе диффузии и прогнозах распространения примесей в атмосфере в районах расположения космодромов, полигонов и близлежащих населенных пунктов, в том числе, для принятия своевременных решений. Кроме того, для предупреждения и предотвращения чрезвычайных ситуаций различные службы нуждаются в разносторонней информации о масштабах распространения и степени опасности вредных веществ в результате РКД. Таким образом, весьма актуальной становится задача по исследованию распространения ЗВ в атмосфере в результате работы ракетных двигателей.

Степень разработанности темы исследования.

В области физики распространения атмосферных примесей работы ведутся по следующим направлениям:

- исследование распространения примесей при различных метеорологических условиях;
- усовершенствование методов расчета и контроля локального, мезомасштабного и дальнего распространения примесей;
- исследования пребывания примесей в атмосфере, их физико-химической трансформации, вымывания осадками и сухого осаждения.

По этим вопросам к настоящему времени достигнуты существенные результаты в Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова, НПО «Тайфун», Российском государственном гидрометеорологическом университете, ЦАО, Гидрометцентре России, и многих других организациях. Это относится к теоретическим исследованиям распространения примесей в

атмосфере, расчетам загрязнения воздуха, использованию научных разработок в практике контроля за чистотой атмосферы (Берлянд М.Е., Алоян А.Е., Бызова Н.Л., Turner D.B. и др.). Разработаны методики расчета, выполнены исследования по климатологии диффузионных параметров, изучена повторяемость различных метеоусловий, определяющих рассеивание примесей.

Тем не менее в ракетно-космической деятельности многие вопросы загрязнения воздуха при пусках РН на жидкостных ракетных двигателях (ЖРД) и ракетных двигателях на твердом топливе (РДТТ) исследованы недостаточно. Остаются актуальными многие вопросы диффузии атмосферных примесей, в частности:

- формализация источников загрязнения атмосферы в виде облака (шлейфа) от ракетных двигателей;
- моделирование и анализ загрязнения атмосферы с учетом локальных условий распространения;
- прогнозирование загрязнения атмосферы при фактических метеорологических параметрах.

Наиболее востребованным в настоящее время является метод численного моделирования и проведение расчетов на его основе с различными исходными данными и метеорологическими условиями, для анализа возможных ситуаций и своевременного выполнения мероприятий, направленных на предупреждение загрязнения окружающей среды выше допустимых показателей.

Совершенствованию численных методов прогноза способствует более полный учет физических и химических атмосферных процессов, определяющих загрязнение атмосферы.

Цель работы.

Целью диссертационной работы является разработка трехмерной математической модели распространения примесей в атмосферном пограничном слое в результате ракетно-космической деятельности и исследование на ее основе загрязнения воздуха с учетом локальных метеорологических условий.

Задачи исследования.

Исходя из сформулированной цели, поставлены следующие основные задачи исследования:

1. Разработка трехмерной численной модели для исследования распространения и турбулентной диффузии примесей, формализация источников загрязнения атмосферного пограничного слоя (АПС) при работе ЖРД и РДТТ.
2. Разработка алгоритмов импорта данных Глобальной прогнозной системы (GFS) в формате GRIB и их интерполяции.
3. Разработка алгоритмов использования радиолокационной информации доплеровских метеорологических радиолокаторов при расчетах распространения и вымывания примесей.
4. Проведение численных экспериментов на основе трехмерной нестационарной модели с детальным учетом термодинамических и

микрофизических процессов и анализ результатов моделирования концентраций вредных веществ при различных условиях.

5. Исследование сухого осаждения и вымывания примесей осадками.

Объект исследования.

Объектом исследования является динамика облака (шлейфа) газообразных загрязняющих веществ, образующегося в результате работы двигателей ракетносителей, его перенос и рассеяние в тропосфере.

Предмет исследования.

Предметом исследования является изменение концентраций загрязняющих веществ в воздухе в приземном слое атмосферы в теплый и холодный периоды года при испытаниях, пусках и утилизации ракетносителей, оценка влияния локальных метеорологических параметров на распространение примесей.

Материалы и методы, применяемые в диссертационной работе.

При выполнении работы использована разработанная автором численная трехмерная модель распространения примесей с учетом осаждения и вымывания осадками. Модель реализована с применением численных методов. Используются данные аэрологического зондирования атмосферы, данные о скоростях ветра, коэффициентах турбулентной диффузии, водностях облаков, полученные с помощью современных российских доплеровских метеорологических радиолокаторов (ДМРЛ-С), данные инструментально измеренных концентраций примесей в воздухе и на подстилающей поверхности вблизи полигонов РКД. При анализе данных численных экспериментов и наблюдений использовались: корреляционно-регрессионный анализ, методы аппроксимации и экстраполяции, трехмерная графика, и другое.

Научная новизна работы.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

1. Разработана трехмерная численная модель для исследования распространения примесей в АПС с учетом фактических метеопараметров при РКД, разработаны алгоритмы расчетов.

2. Разработана методика использования в модели расчетных данных о состоянии атмосферы, получаемых с помощью Глобальной прогнозной системы (GFS).

3. Разработана методика использования трехмерных полей скорости горизонтального ветра и турбулентности, измерение которых проводится с помощью доплеровских радиолокаторов ДМРЛ-С.

4. Проведен анализ концентраций вредных примесей в районе полигона РКД от источников загрязнения атмосферы в виде ЖРД и РДТТ для теплого и холодного периодов года с учетом структуры горизонтального ветра. Получены оценочные характеристики сухого осаждения и вымывания осадками загрязняющих веществ на территории полигона.

Теоретическая и практическая значимость работы.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в следующем:

- методы и алгоритмы, использованные в трехмерной численной модели, дополняют методологию применения математического моделирования для исследования вопросов распространения примесей в атмосфере с учетом сдвига и разворота горизонтального ветра с высотой;
- результаты моделирования концентраций ЗВ могут применяться при разработке программно-математического обеспечения автоматизированного рабочего места системы предупреждения об опасном загрязнении воздуха;
- исследование случаев гидрометеорологических условий, при которых наблюдаются повышенные концентрации ЗВ, позволит уменьшить риски нанесения ущерба окружающей среде при планировании работы полигонов и космодромов;
- результаты диссертационного исследования могут быть использованы для усовершенствования системы экологического мониторинга и выбора расположения пробных площадок контроля загрязнения окружающей среды при РКД.

Основные научные положения, выносимые на защиту.

На защиту выносятся следующие положения диссертационной работы:

1. Разработанная трехмерная модель переноса и турбулентной диффузии примесей в АПС с учетом фактических метеопараметров.
2. Методика инициализации трехмерного распределения метеорологических параметров в расчетной области по данным Глобальной прогнозной системы.
3. Методика применения в модели данных метеорологических радиолокаторов ДМРЛ-С.
4. Результаты моделирования распространения и диффузии облака примесей на полигонах РКД при локальных метеорологических условиях теплого и холодного периодов года, оценка влияния трехмерной структуры поля ветра в атмосфере на распространение облака примесей.

Личный вклад автора.

Совместно с научным руководителем сформулированы цели и задачи диссертационного исследования.

1. Автором разработаны: трехмерная модель распространения примесей при РКД с учетом фактических метеопараметров, алгоритмы применения данных GFS и доплеровской радиолокационной информации при моделировании распространения примесей, алгоритмы расчетов вымывания ЗВ осадками и туманами.
2. Самостоятельно проведены и проанализированы результаты численных экспериментов по исследованию динамики распространения примесей в результате РКД при различных состояниях атмосферы, полях ветра и коэффициентах турбулентной диффузии.
3. Собраны и обработаны данные по загрязнению ОПС на полигонах РКД, рассмотрены существующие экологические нормативные документы, проведено сравнение результатов расчетов с данными измерений.
4. Автором исследованы характеристики распространения примесей на полигонах РКД, сухого осаждения ЗВ и вымывания осадками.

Достоверность.

Достоверность результатов диссертационной работы обеспечивается использованием корректных аналитических и численных методов исследования, использованием трехмерной модели, большим количеством численных экспериментов и широкой сравнительной базой. В работе использованы современные интегрированные системы разработки прикладного программного обеспечения, которые включают средства детального контроля полученного решения и отладки программного кода. Достоверность полученных результатов также обеспечивает применение трехмерной графики для анализа результатов моделирования.

Апробация работы.

Полученные в ходе выполнения диссертационного исследования результаты докладывались и обсуждались на: XI Международной научно-практической конференции «Фундаментальная и прикладная наука – 2016» (Москва, 2016 г.); XIV Международной научной конференции Евразийского Научного Объединения «Наука и Современность» (Москва, 2017 г.); XXXIII Международной научно-практической конференции «Проблемы и перспективы современной науки» (Москва, 2017 г.); XXX Симпозиуме радиолокационного исследования природных сред (Санкт-Петербург, 2017 г.); Всероссийской конференции с международным участием «Устойчивое развитие: Проблемы, концепции, модели» (Нальчик, 2017 г.); Всероссийской конференции по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы (Нальчик, 2017 г.); IV Международной конференции «Инновационные подходы и современная НАУКА», (г. Киев, 2018 г.); XXXIX Международной научной конференции «Стратегии устойчивого развития мировой науки», (Москва, 2018 г.); XXIX Международной научно-практической конференции «Фундаментальные и прикладные научные исследования: актуальные вопросы, достижения и инновации», (Москва, 2019 г.), 69-й Международной научной конференции Евразийского Научного Объединения «Научные исследования и разработки» (Москва, 2020 г.). Также результаты исследований докладывались и обсуждались на семинарах и итоговых сессиях Ученого совета ФГБУ «Высокогорный геофизический институт», ФГБУ «НПО «Тайфун» и ФГБОУ «Российский государственный гидрометеорологический университет».

Внедрение результатов исследования.

Результаты диссертационной работы были использованы:

- при усовершенствовании методов и средств контроля загрязнения ОПС в обществе с ограниченной ответственностью (ООО) «Экспертный центр безопасности гидротехнических сооружений» (г. Москва);
- в Высокогорном научно-исследовательском испытательном центре авиационной техники и вооружений (г. Нальчик), при подготовке и проведении испытаний средств вооружений и оптико-электронных средств контроля в 2016-2017 гг., для оценки экологической нагрузки на ОПС;
- при разработке планов (программ) экологического мониторинга полигонов РКД, с последующим согласованием в подразделениях Росгидромета РФ, а также при оценке воздействия на окружающую среду

испытаний ракетно-космических комплексов различного назначения (ООО «ЭКОПРОМСЕРТИФИКА», г. Москва).

В Роспатенте зарегистрировано программное обеспечение численного моделирования распространения примесей в атмосфере с учетом метеорологических условий «МЗД-ДИФФ» (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2017617322 от 04.07.2017 года).

Публикации по теме диссертации.

Основные результаты исследований опубликованы в 21 научной статье, в том числе 6 - в журналах, рекомендованных ВАК РФ для публикации материалов диссертационных исследований. Общий объем работ составляет 8 печатных листов.

Структура и объем работы.

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и приложений. Общий объем диссертационной работы составляет 148 страниц, в том числе список литературы из 123 наименований работ, из них 38 на иностранных языках.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы исследования, формулируются цели и задачи диссертационной работы, характеризуется существующая база по исследуемому вопросу, раскрывается научная новизна и практическая значимость полученных результатов.

В первой главе представлены результаты анализа материалов по существующим подходам в проблеме исследования распространения ЗВ в тропосфере, по численным методам прогноза загрязнения воздуха.

Проанализированы современные численные модели распространения примесей в АПС, в том числе, от кратковременных мощных источников, методы расчета коэффициентов турбулентной диффузии, учета ветра при моделировании распространения примесей.

Совершенствованию численных методов прогноза способствует более полный учет физических процессов, определяющих загрязнение атмосферы.

В главе отмечены проблемы, которые требуют дальнейшего исследования. На основе проведенного анализа сформулированы цель и задачи диссертационного исследования.

Во второй главе рассмотрены факторы воздействия на окружающую среду и источники загрязнения, характерные для РКД. Приведены разновидности компонентов ракетного топлива, особенности эксплуатации, опасные продукты сгорания ЖРД и РДТТ.

В общем случае виды воздействия на окружающую среду РКД рассматриваются в разрезе стадий жизненного цикла РН, таких как научная, проектная, разработка, испытание, производство (изготовление, эксплуатация, снятие с эксплуатации), утилизация (ликвидация). Наиболее значимыми с точки зрения экологического воздействия являются этапы проведения испытаний и эксплуатации вновь разрабатываемых или существующих ракетных комплексов.

Выделяют два типа ракетных двигателей: жидкостные ракетные двигатели и ракетные двигатели на твердом топливе.

Жидкое топливо включает в себя два компонента – окислитель и горючее и по уровню токсичности и безопасности хранения своих компонентов намного опаснее с экологической точки зрения, чем многокомпонентная система твердых топлив.

Испытания РН и двигательных установок требуют транспортировки и хранения больших количеств взрывопожароопасных и токсичных компонентов ракетного топлива. На стадии создания (отработки) и эксплуатации ракетноносителей возможны аварийные исходы испытаний с проливами и выбросами компонентов ракетного топлива, поэтому используемая на испытательных комплексах и полигонах технология проведения испытаний должна отвечать определенным требованиям и правилам, в том числе, по экологической безопасности. Особое внимание при этом необходимо уделять влиянию на окружающую среду от ракетно-космической деятельности при неблагоприятных метеорологических условиях.

В третьей главе приведены метеорологические параметры, характерные для наиболее интенсивно работающих космодромов и полигонов в области ракетно-космической деятельности («Плесецк», «Байконур», «Ясный», «Восточный», «Капустин Яр», «НИИ «Геодезия»).

В частности, территория «НИИ «Геодезия», для которого проведена серия расчетов распространения примесей, характеризуется преобладанием ветров западной составляющей (западные, северо-западные, и юго-западные) и южных ветров. Господствующей воздушной массой является воздух умеренных широт. Повторяемость различных направлений ветра представлена в таблице 1.

Таблица 1. Повторяемость направлений ветра и штилей «НИИ «Геодезия»

Месяц	Румбы								Штиль
	С	СВ	В	ЮВ	Ю	ЮЗ	З	СЗ	
1	7	3	6	9	30	13	24	8	8
2	8	4	9	11	30	10	18	10	10
3	7	3	9	11	33	10	20	7	9
4	10	6	15	9	28	8	17	7	10
5	13	7	12	7	24	9	20	8	13
6	12	7	14	6	20	9	22	10	16
7	15	7	13	8	18	7	21	11	19
8	11	5	13	7	20	10	25	9	18
9	9	5	11	7	26	10	22	10	14
10	7	4	6	8	30	13	24	8	9
11	8	3	8	10	32	13	20	6	5
12	7	2	7	9	33	13	22	7	6
Год	10	5	10	9	27	10	21	8	11

Необходимость более точного учета метеорологических условий объясняется тем, что характер переноса и рассеяния примесей зависит от

комплекса этих условий. Существенно зависит процесс распространения от скорости ветра, его вертикального профиля, от температурной и влажностной стратификации атмосферы. При этом для различных типов источников выбросов его влияние неоднозначно.

В четвертой главе представлена разработанная численная трехмерная нестационарная модель переноса и турбулентной диффузии загрязняющих частиц в тропосфере и некоторые результаты тестовых расчетов на ее основе.

Уравнения гидротермодинамики описывают влажную конвекцию в приближении Буссинеска, в уравнениях учитывается адвективный и турбулентный перенос, силы плавучести, трения и барических градиентов (для упрощения записи переменные, от которых зависят функции, опущены):

$$\begin{aligned}\frac{\partial u}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla)u &= -\frac{\partial \pi'}{\partial x} + \Delta' u, \\ \frac{\partial v}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla)v &= -\frac{\partial \pi'}{\partial y} + \Delta' v, \\ \frac{\partial w}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla)w &= -\frac{\partial \pi'}{\partial z} + \Delta' w + g(\theta'/\theta_0 + 0,61s' - Q_s),\end{aligned}\tag{1}$$

уравнения неразрывности:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = \sigma w,\tag{2}$$

уравнения термодинамики:

$$\begin{aligned}\frac{\partial \theta}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla)\theta &= \frac{L_k}{C_p} \frac{\theta}{T} \frac{\delta M_k}{\delta t} + \frac{L_c}{C_p} \frac{\theta}{T} \frac{\delta M_c}{\delta t} + \frac{L_3}{C_p} \frac{\theta}{T} \frac{\delta M_3}{\delta t} + \Delta' \theta \\ \frac{\partial s}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla)s &= -\frac{\delta M_k}{\delta t} - \frac{\delta M_c}{\delta t} + \Delta' s,\end{aligned}\tag{3}$$

$$\text{где } (\vec{V} \cdot \nabla) \equiv u \frac{\partial}{\partial x} + v \frac{\partial}{\partial y} + w \frac{\partial}{\partial z}, \quad \Delta' = \frac{\partial}{\partial x} K_x \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} K_y \frac{\partial}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} K_z \frac{\partial}{\partial z},$$

$\vec{V} = \{u, v, w\}$ - вектор скорости; $u(x, y, z, t)$, $v(x, y, z, t)$, $w(x, y, z, t)$ - компоненты вектора скорости воздушных потоков в атмосфере и облаке; $\theta(x, y, z, t)$ - потенциальная температура; $\pi(x, y, z, t) = C_p \bar{\theta} (P(x, y, z, t)/1000)^{R/C_p}$ - приведенное давление; $\bar{\theta}$ - средняя потенциальная температура; R - газовая постоянная; $s(x, y, z, t)$ - удельная влажность воздуха; $Q_s(x, y, z, t)$ - суммарное отношение смеси жидкой и твердой фаз в облаке; $\sigma(z)$ - параметр, учитывающий изменение плотности воздуха с высотой; $P(x, y, z, t)$ и $T(x, y, z, t)$ - соответственно давление и температура; C_p - теплоемкость воздуха при постоянном давлении; L_k , L_c , L_3 - соответственно удельная теплота конденсации, сублимации и замерзания; $\pi'(x, y, z, t)$, $\theta'(x, y, z, t)$, $s'(x, y, z, t)$ - отклонения приведенного давления, потенциальной температуры и удельной влажности от их фоновых значений в окружающей атмосфере, которые обозначим как

$\pi_\phi(x,y,z)$, $\theta_\phi(x,y,z)$ и $s_\phi(x,y,z)$; $\frac{\delta M_K}{\delta t}$, $\frac{\delta M_C}{\delta t}$ - изменения удельной влажности за счет диффузии пара на капли и кристаллы; $\frac{\delta M_3}{\delta t}$ - масса капельной воды, замерзающей в единицу времени в единице объема воздуха; $K_x(x,y,z,t)$, $K_y(x,y,z,t)$, $K_z(x,y,z,t)$ - коэффициенты турбулентной диффузии по осям координат.

Начальные условия для системы уравнений (1) - (3) имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} u(x,y,z,0) &= u^0(x,y,z), \\ v(x,y,z,0) &= v^0(x,y,z), \\ w(x,y,z,0) &= w^0(x,y,z), \\ \theta(x,y,z,0) &= \theta^0(x,y,z), \\ s(x,y,z,0) &= s^0(x,y,z). \end{aligned} \quad (4)$$

На боковых границах области используются фоновые условия по термодинамическим параметрам.

Перенос многокомпонентных газовых примесей рассчитывается с учетом микрофизических процессов вымывания осадками и туманами.

Уравнения для изменения со временем концентрации газовых примесей и аэрозолей $C_i(x,y,z,t)$ записываются в следующем виде:

$$\begin{aligned} \frac{\partial C_i}{\partial t} &= -u \frac{\partial C_i}{\partial x} - v \frac{\partial C_i}{\partial y} - (w - V_{ai}) \frac{\partial C_i}{\partial z} + \Delta' C_i + \\ &\left(\frac{\partial C_i}{\partial t} \right)_{KG} + \left(\frac{\partial C_i}{\partial t} \right)_{AK} + F_i, \end{aligned} \quad (5)$$

где V_{ai} , - установившиеся скорости падения крупных аэрозольных частиц; $\left(\frac{\partial C_i(x,y,z,t)}{\partial t} \right)_{KG}$, $\left(\frac{\partial C_i(x,y,z,t)}{\partial t} \right)_{AK}$ - изменения концентрации примесей за счет микрофизических процессов коагуляции с каплями и ледяными кристалликами, соответственно; $F_i(x,y,z)$ - источники и стоки примесей и аэрозолей.

Система уравнений (1-5) рассматривается в области

$$D = \{x \in [0, Lx], y \in [0, Ly], z \in [0, Lz], t \in [0, T]\} \quad (6)$$

где Lx , Ly , Lz – границы пространственной области интегрирования, T – момент времени, до которого рассматривается эволюция облака примесей.

Для системы уравнений (5) используются следующие начальные и граничные условия:

$$C_i(x,y,z,0) = C_i^0(x,y,z). \quad (7)$$

$$C_i(x,y,z,t) = 0 \text{ при } x=0, Lx,$$

$$C_i(x,y,z,t) = 0 \text{ при } y=0, Ly,$$

$$\begin{aligned} C_i(x, y, z, t) &= 0 \text{ при } z=L_z, \\ \frac{\partial C_i(x, y, z, t)}{\partial z} &= 0 \text{ при } z=0. \end{aligned} \quad (8)$$

Задача сформулирована в предположении, что в начальный момент времени характеристики облака примесей известны и соответствуют сформировавшемуся облаку газов после окончания работы ракетных двигателей. В облаке имеется относительно небольшой перегрев по отношению к окружающей атмосфере (несколько градусов). Стадия работы двигателей и подъема сильно разогретой газовой смеси в данном исследовании не рассматривалась.

Для описания коагуляционных процессов захвата примесей каплями в облачной среде (при наличии облаков или туманов в области, применительно к которой проводятся расчеты) использовалось интегро-дифференциальное уравнение в виде:

$$\left(\frac{\partial C_i(x, y, z, t)}{\partial t} \right)_{\text{кг}} = -C_i(x, y, z, t) \int_{D_{\min}}^{D_{\max}} \beta_1(D) \cdot n(D) dD \quad (9)$$

где $\beta_1(D) = \pi \cdot D^2 / 4 \cdot |V_r(D)| \cdot E_{\text{ли}}(D)$ – ядро уравнения коагуляции; D – диаметр капель; $V_r(D)$ – скорость падения капель; $E_{\text{ли}}(D)$ – коэффициенты захвата примесей каплями диаметром D ; $n(D)$ – функция распределения капель по размерам. Предполагалось, что имеются облака с известным распределением капель осадков по размерам и водностью. В частности, по И.В. Литвинову спектр капель осадков удовлетворительно описывается формулой $n(D) = \text{const} \cdot \exp(-\alpha \cdot D^{3/2})$.

Расчет взаимодействия примесей со снежинками в облаках выполняется на основе аналогичных выражений.

Для вычисления скорости падения капель дождя используется полиномиальная аппроксимация экспериментальных данных:

$$V_r = -0,267 + 51,5 \cdot D_r - 102,25 \cdot D_r^2 + 75,5 \cdot D_r^3, \quad (10)$$

где D_r – диаметр капли в см.

Для вычисления скорости падения ледяных частиц применяются аппроксимационные формулы для кристаллов различного типа:

$$V_s = a D_s^b, \quad (11)$$

где V_s – скорость падения частицы в м/с, D_s – диаметр частицы в мм, а a и b – константы.

Слагаемые $F_i(x, y, z)$ позволяют учитывать сухое осаждение примесей:

$$F_i(x, y, z) = -\gamma_i(x, y) \cdot C_i(x, y, z) \quad \text{при } z = 0, \quad (12)$$

$$F_i(x, y, z) = 0 \quad \text{при } z > 0, \quad (13)$$

где $\gamma_i(x, y)$ – коэффициенты поглощения i -ой компоненты примеси в зависимости от типа подстилающей поверхности. Для некоторых

загрязняющих веществ экспериментальные значения коэффициентов поглощения приведены в справочной литературе.

Наибольшего внимания заслуживает вопрос об определении вертикального K_z и горизонтального K_x коэффициентов турбулентности, входящих в уравнения модели.

Для расчета K_z существует три метода: 1) параметризация K_z в виде априорных функций высоты и стратификации; 2) выражение его через путь смещения l и параметризация $l(z)$; 3) дополнение уравнений движения другими уравнениями и соотношениями, замыкающими всю систему, и расчет $K_z(z)$ из замкнутой системы уравнений.

Для учета зависимости динамики АПС от стратификации применялись следующие формулы:

$$K(z) = [\chi(z + z_0)(1 + \alpha Ri)]^2 \frac{\partial u}{\partial z}, \quad Ri \geq -0.03,$$

$$K(z) = \lambda_s z^2 \frac{g}{T} \left[\frac{\partial \theta}{\partial z} \right]^{1/2}, \quad Ri < -0.03, \quad (14)$$

где $Ri = \left(\frac{g}{\theta} \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) / \left[\left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right]$ - число Ричардсона; $\alpha = -3$; λ_s - параметр шероховатости; χ - постоянная Кармана.

Система уравнений (1) - (14) решалась по неявной схеме методами покомпонентного расщепления и прогонки. Несмотря на определенную сложность реализации схемы, она обеспечивает необходимую устойчивость счета, аппроксимацию второго порядка точности по пространству и времени, и является консервативной.

Исходной информацией для инициализации модели являются термодинамические параметры атмосферы и данные о характеристиках источников примесей.

В главе приведена методика использования трехмерных начальных данных в разработанной численной модели. Сущность подхода заключается в том, что начальные значения давления, температуры, точки росы, направления и скорости ветра заполняются путем интерполяции данных, полученных по глобальной модели GFS с разрешением 0,25 градуса, которые доступны пользователям в формате GRIB. Данные представлены вертикальными столбами в атмосфере (несколько точек по высоте), в которых приведены приземные значения параметров на изобарических поверхностях.

Сначала интерполируются данные между точками по меридиану, затем между узлами – по долготе. Заполняются все узлы сетки расчетной области в горизонтальной плоскости. Аналогично заполняются все плоскости по высоте. В горизонтальной плоскости интерполяция выполняется в географических координатах.

Для получения прогностических полей термодинамических параметров могут применяться, как данные GFS в вертикальных столбах атмосферы, так и данные шаропилотного зондирования атмосферы. Во втором случае имеем горизонтально однородное распределение параметров, зависящее только от высоты, но из зонда данные могут быть более корректными и с более высоким разрешением по высоте.

Одним из сложных элементов модели является формализация начального облака примесей, формирующегося при прожиге РДТТ на открытом стенде. Для горизонтального прожига РДТТ с отбойным валом был выбран вариант разбиения горизонтального и вертикального участков струи на сегменты (слои) по оси струи. Для каждого сегмента и для каждой компоненты примесей формируется таблица, в которой задаются: радиус струи, угол отрыва от горизонта, угол отклонения от направления на восток, концентрация примеси на оси, температура сегмента. Сумма слоев образует полную длину факела (облака примеси). Задаются координаты всех слоев, составляющих факел. Эти данные интерполируются в ближайшие узлы пространственной сетки модели. В результате работы вспомогательного модуля программного обеспечения (ПО) модели формируется файл с начальной концентрацией N компонент основных загрязнителей, образующихся при прожиге РДТТ на открытом стенде.

Для формализации облака примесей при работе ЖРД и РДТТ в вертикальном положении использовалось выражение, соответствующее нормальному закону распределения частиц в пространстве вокруг точки работы двигателя:

$$C_i^0(x, y, z) = Q_i \cdot \exp(-(x_0 - x)^2 / B_x^2) \cdot \exp(-(y_0 - y)^2 / B_y^2) \cdot \exp(-(z_0 - z)^2 / B_z^2), \quad (15)$$

где Q_i - максимальная концентрация i -й компоненты примесей в центре облака; центр имеет координаты (x_0, y_0, z_0) ; B_x , B_y , B_z - параметры, определяющие скорость уменьшения концентрации в направлениях по осям координат.

Начальный размер облака примеси может составлять от 50 до 200 метров по вертикали, и 50 – 400 метров по горизонтали.

В главе 4 также рассмотрена методика использования данных метеорологического радиолокатора ДМРЛ-С, позволяющего обнаруживать облака и связанные с ними метеорологические явления в радиусе 250 км от места установки. При наличии на космодроме доплеровского метеорологического радиолокатора реальные параметры облаков, воздушных потоков и турбулентности в локальной области можно задавать по данным оперативных радиолокационных наблюдений.

Данные ДМРЛ используются для задания поля ветра в численной модели распространения примесей следующим образом: локальная область моделирования (пространственный домен) имеет строгие географические координаты, так же как и все узлы расчетной сетки в ней. Полярная или декартова система координат ДМРЛ-С также имеет однозначную географическую привязку. Если область моделирования попадает в зону радиолокационного обзора ДМРЛ-С, то значения параметров в узлах

расчетной сетки заполняются с помощью интерполяции данных из ближайших узлов радиолокационной сетки.

Для расчета влажного вымывания примесей атмосферными осадками в модели могут использоваться, как данные по осадкам, измеренные радиолокационным методом, так и их прогноз по глобальной модели.

В главе 5 приведены некоторые результаты исследований распространения вредных примесей и воздействия на окружающую среду от выбросов ЖРД и РДТТ при проведении испытаний, пусков РН и утилизации ракетных двигателей методом прожига. Исследования выполнены с учетом локальных метеорологических условий. В численных экспериментах исследовались: динамика изменения концентрации ЗВ в течение единиц и десятков минут, максимальные концентрации основных ЗВ, параметры облака примесей. В расчетах использовались как модельные, так и экспериментальные начальные данные по содержанию вредных веществ и геометрии облака.

В частности, расчеты были проведены для пространственной области $10 \times 10 \times 5$ км с шагом $d_x = d_y = d_z = 0,1$ км. На рисунке 1 приведены изолинии концентрации примеси в начальный момент от объемного источника.

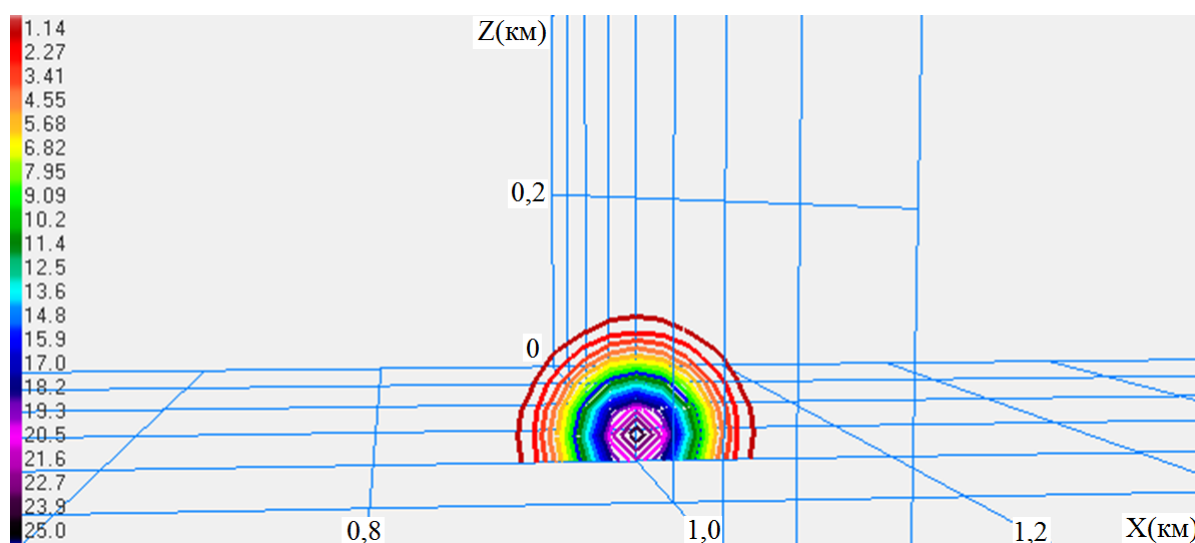


Рисунок 1 – Изолинии концентрации примеси в начальный момент времени, максимальная концентрация равна $C_m = 25 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-3}$

На рисунке 2 приведено это же облако примеси через 5 минут от начального состояния. Отмечается увеличение размеров облака примеси и уменьшение максимальной концентрации.

Было проведено несколько десятков численных экспериментов при различных условиях для теплого и холодного периодов года. Результаты расчетов позволили оценить характер распространения при фактических метеопараметрах и концентрации ЗВ.

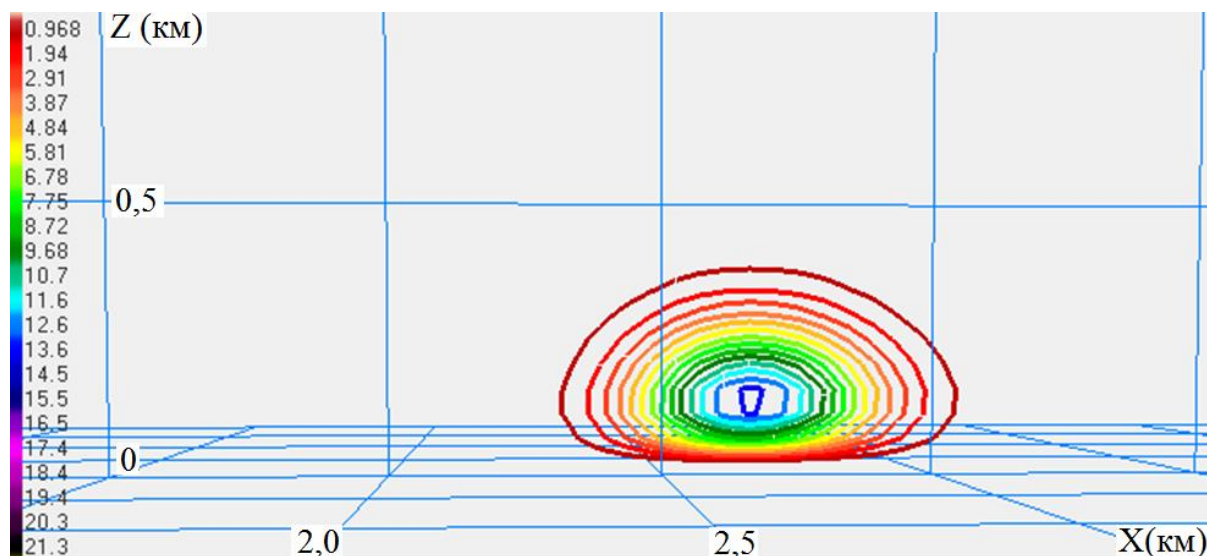


Рисунок 2 – Изолинии концентрации примеси в момент времени $t=300$ с, максимальная концентрация равна $C_m = 13,9 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-3}$

В главе рассмотрены также некоторые результаты численного моделирования рассеивания загрязняющих веществ при испытаниях ракетносителей в атмосфере с вертикальным сдвигом ветра (изменение скорости ветра с высотой) и с разворотом ветра. Для вертикального распределения термодинамических параметров атмосферы за основу взяты данные аэрологического зондирования. По результатам расчетов верхние слои шлейфа примесей рассеиваются быстрее при сдвиге ветра из-за более быстрого возрастания коэффициентов турбулентной диффузии с высотой.

Приведены также результаты численных экспериментов по анализу распространения оксида алюминия при сопловом сжигании РДТТ. Источник ЗВ имеет следующие параметры:

- продолжительность выброса газовой смеси (ГВС) около 80 с;
- диаметр устья источника около 2,0 м;
- температура на выходе около 2303°K;
- средняя скорость выхода ГВС около 2200 м/с;
- оксид алюминия около 12,90 тонны;
- объем облака примеси около 330000 м³.

Была вычислена начальная концентрация примеси в поднимающемся над местом прожига РДТТ облаке, значение которой составило для Al_2O_3 $C_0 = 164 \text{ мг/м}^3$. Некоторые результаты расчетов по трехмерной модели для теплого периода года приведены в таблице 2, а для холодного периода – в таблице 3. Приведены значения концентрации Al_2O_3 в приземном слое в момент времени $t=10$ мин в узлах сетки с шагом 0,5 км по горизонтальным координатам X и Y , с 3-го по 8-й км по оси X , вдоль которой перемещалась примесь (часть массива данных). Каждая строка соответствует координате Y_i , каждый столбец – координате X_i . Из данных видно, что облако со временем «касается» поверхности земли и загрязняет приземный воздух.

Таблица 2. Значения концентрации оксида алюминия в приземном слое воздуха в теплый период года в прямоугольной области в момент $t=10$ мин. Расстояние дано в км, концентрация в мг/м^3 .

Y/X	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0
2,0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2,5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3,0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3,5	0.00	0.00	0.01	0.07	0.38	0.98	1.27	0.90	0.36	0.09	0.01
4,0	0.00	0.00	0.05	0.69	3.74	9.56	12.43	8.83	3.62	0.90	0.14
4,5	0.00	0.00	0.01	0.07	0.38	0.98	1.27	0.90	0.36	0.09	0.01
5,0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5,5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6,0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

На оси эллипса загрязнения в приземном слое концентрация составила $12,4 \text{ мг/м}^3$ (максимально-разовая ПДК не установлена, среднесуточная составляет $0,01 \text{ мг/м}^3$).

Таблица 3. Значения концентрации оксида алюминия в приземном слое воздуха в холодный период года

Y/X	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0
2,0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2,5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3,0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3,5	0.00	0.00	0.00	0.04	0.21	0.54	0.70	0.50	0.20	0.05	0.01
4,0	0.00	0.00	0.03	0.40	2.16	5.53	7.18	5.09	2.08	0.51	0.08
4,5	0.00	0.00	0.00	0.04	0.21	0.54	0.70	0.50	0.20	0.05	0.01
5,0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5,5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6,0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

На оси эллипса загрязнения в приземном слое концентрация составила $7,18 \text{ мг/м}^3$. В расчетах для зимнего периода отмечались меньшие значения концентрации примесей в приземном слое.

Аналогичные численные эксперименты могут помочь скорректировать местоположение измерительных приборов для контроля качества атмосферного воздуха на территории космодромов.

По результатам расчетов переноса и турбулентной диффузии ЗВ в атмосфере со сдвигом и разворотом горизонтального ветра с высотой характер распространения заметно отличается от результатов, получаемых в гауссовых моделях. На рисунке 3 приведены изолинии концентрации примеси в момент 300 с, вид сверху. Изолинии от наружного контура к внутреннему имеют значения: 0.001; 0.01; 0.1; 0.25; 0.5; 1.0; 5.0 (в единицах ПДК). Желтый контур 0.340. Вспомогательная сетка имеет ячейки 2×2 км.

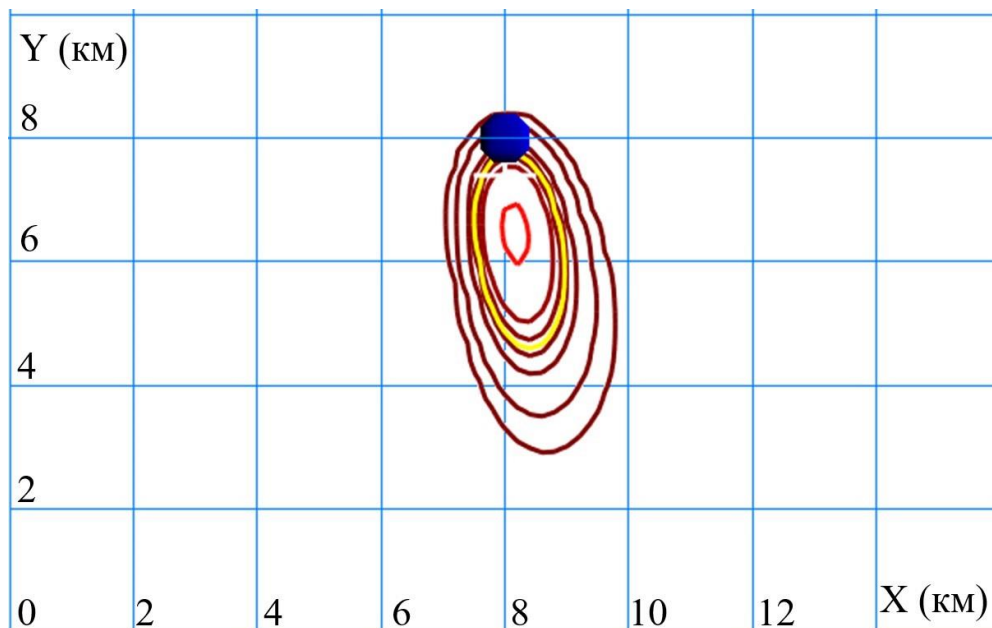


Рисунок 3 – Начальное положение облака ЗВ и изолинии концентрации в момент 300 с, вид сверху

При удовлетворительных рассеивающих свойствах АПС, когда не наблюдается превышение ПДК по ЗВ, прогнозный период времени считается допустимым для выполнения производственных работ.

Фактические метеопараметры могут быть получены 2 раза в сутки (по данным аэрологического зондирования в ближайшем к полигону пункте), при этом расчеты повторяются с новыми данными, период времени для выполнения производственных работ уточняется.

Весной и летом, когда температуры выше, интенсивность турбулентного обмена больше, рассеивание примесей усиливается. Выбрасываемые газы обладают плавучестью, за счет перегрева относительно окружающего воздуха. В результате вблизи источника создается поле вертикальных скоростей, способствующих подъему факела и уносу примесей вверх. Малые скорости ветра увеличивают эффективный подъем факела, что влияет на уменьшение концентрации в приземном слое. С другой стороны, усиление скорости ветра приводит к снижению концентрации загрязняющих веществ в рабочей области за счет быстрого выноса примесей.

Анализ данных замеров показал, что обнаружить выбрасываемые в процессе испытаний и утилизации РН методом прожига загрязняющие вещества в компонентах окружающей природной среды достаточно затруднительно. Применение разработанной численной модели распространения примесей от работы ракетных двигателей с учетом фактических полей метеорологических параметров позволит выбирать наиболее показательные площадки для отбора проб в рамках оценки экологической безопасности и экологического мониторинга ракетно-космической деятельности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключении приведены основные результаты диссертационной работы:

1. В проведенном исследовании были выявлены основные факторы, сопровождающие полет ракетоносителей, оказывающие влияние на компоненты окружающей среды. Исследовались процессы воздействия пуска изделий на приземные слои атмосферы и отделяющихся частей ракеты на природную среду в районах падения. Анализировалась работа оборудования и техники, обеспечивающих подготовку к пуску и пуск изделий. Все исследования проводились для штатной эксплуатации, с учетом возможных аварийных ситуаций. Проведен анализ опасных вредных веществ, содержащихся в компонентах ракетных топлив.

2. Проанализированы метеорологические условия на основных полигонах, где осуществляется ракетно-космическая деятельность. Дана характеристика влияния некоторых метеорологических факторов на распространение и концентрации загрязняющих веществ. С учетом того, что характер рассеивания и переноса примесей существенно зависит от комплекса локальных метеорологических параметров, необходимо совершенствовать расчетные методики с целью более полного учета имеющихся, как экспериментальных, так и прогнозных данных, характеризующих состояние атмосферы в локальной области РКД.

3. Разработана трехмерная численная модель термодинамических и микрофизических процессов в атмосфере для расчетов распространения облака примесей, образующихся при работе ракетных двигателей, и алгоритмы реализации модели на ЭВМ. Проведена проверка модели путем решения тестовых задач, с помощью сравнения результатов с данными наблюдений и с результатами расчетов по другим моделям. Для анализа числовой информации применялось программное обеспечение трехмерной визуализации данных моделирования, которое обеспечивает высокий уровень контроля входных и выходных трехмерных параметров модели.

4. Предложена методика инициализации термодинамических параметров модели с помощью импорта и интерполяции данных прогнозной системы GFS. Разработана методика учета данных доплеровских метеорологических радиолокаторов ДМРЛ-С при расчетах распространения вредных примесей в ближней зоне в районе полигонов РКД. Сущность подхода заключается в интерполяции значений параметров, измеренных радиолокатором, в узлы декартовой сетки трехмерной модели, описывающей эволюцию облака примеси.

5. Проведен численный анализ распространения вредных примесей от кратковременных источников в виде двигателей ракетоносителей, при различных метеорологических параметрах для теплого и холодного периодов года, в том числе, при сдвиге ветра в атмосфере. Полученные с помощью детальной трехмерной модели результаты отражают нелинейные эффекты физики распространения примесей, которые невозможно исследовать и оценить при использовании более простых моделей. Сравнительный анализ результатов моделирования с данными расчетов по упрощенным моделям

показывает, что упрощенные методики недостаточно учитывают состояние погоды в зоне РКД.

6. На основе разработанной в диссертации модели исследовано распространение загрязняющих веществ в атмосфере с учетом их вымывания осадками и поглощения подстилающей поверхностью. Получены расчетные оценки поглощения загрязняющих веществ в осадках и туманах с известными спектрами частиц и водностью.

Предложенная в работе модель и подходы могут применяться в дальнейших прикладных исследованиях по изучению различных аспектов распространения загрязняющих веществ в атмосферном пограничном слое, в физике облаков для исследования распространения и вымывания аэрозолей, для разработки информационной технологии наукастинга распространения загрязняющих веществ при испытаниях и пусках ракетных двигателей, а также для разработки методических рекомендаций по организации системы экологического мониторинга при эксплуатации космодромов и полигонов.

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации:

Публикации в изданиях из перечня ВАК РФ:

1. Рязанов, В.И. Трехмерная численная модель распространения примесей в атмосфере с детальным учетом локальных метеорологических параметров / **В.И. Рязанов**, А.В. Шаповалов, В.А. Шаповалов // Естественные и технические науки. – 2016. – №10 (100). – С. 27 – 34.

2. Рязанов, В.И. Математическое моделирование распространения примесей в атмосфере от выбросов ракетных жидкостных двигателей на основе трехмерной модели и некоторые результаты расчетов / **В.И. Рязанов** // Современный научный вестник. – 2017. – Т. 9, № 2. – С. 25 – 33.

3. Шаповалов, А.В. Моделирование электрических процессов в грозах в Северо-Кавказском регионе / А.В. Шаповалов, М.Ю. Пашкевич, **В.И. Рязанов**, В.А. Шаповалов, Н.А. Березинский, Р.В. Шереметьев, А.С. Камруков. // Геология и геофизика Юга России. – 2017. – №1. – С. 94 – 101.

4. Шаповалов, А.В. Исследование распространения в ближней зоне продуктов работы ракетных двигателей / А.В. Шаповалов, В.А. Шаповалов, **В.И. Рязанов** // Успехи современной науки и образования. – 2017. – Т. 9, № 4. – С. 201 – 206.

5. Шаповалов, А.В. Математическая модель распространения примесей в ближней зоне при работе ракетных двигателей / А.В. Шаповалов, В.А. Шаповалов, **В.И. Рязанов** // Наука. Инновации. Технологии. – 2017. – № 2. – С. 87 – 96.

6. Рязанов, В.И. Численное моделирование загрязнения окружающей среды от выбросов твердотопливных ракетных двигателей в тёплый и холодный периоды года [Электронный ресурс] / **В.И. Рязанов** // Научный рецензируемый электронный сетевой журнал «Московский экономический журнал». - М.: Издательство «Электронная наука». - 2020. - №10/2020. - Режим доступа: <https://qje.su/rekreacia-i-turizm/moskovskij-ekonomicheskij-zhurnal-10-2020-41/>

Публикации в других изданиях:

7. Рязанов, В.И. Математическое моделирование распространения примесей в атмосфере для локальной области с учетом фактических или прогнозных полей метеорологических параметров / **В.И. Рязанов**, А.А. Аджиева, В.А. Шаповалов // Материалы Международной научной конференции «Актуальные проблемы прикладной математики и физики». – 2017. – том 154. – С. 3 – 9.

8. Шаповалов, А.В. Численная модель распространения примесей в атмосфере с учетом локальных метеорологических условий / А.В. Шаповалов, В.А. Шаповалов, **В.И. Рязанов**, Ф.Х. Увижева, М.А. Шериева // Материалы международной научной конференции «Актуальные проблемы прикладной математики и физики». – 2017. – том 154. – С. 99 – 104

9. Рязанов, В.И. Моделирование распространения примесей в атмосфере с учетом локальных метеорологических условий / **В.И. Рязанов**, А.В. Шаповалов, В.А. Шаповалов // Сборник научных трудов Высокогорного геофизического института. Физика облаков и активные воздействия. Склоновые процессы. Экологические проблемы. Загрязнение окружающей среды. – Уфа. – 2017. – С. 17 – 23.

10. Шаповалов, А.В. Комплексная обработка радиолокационной и грозопеленгационной информации / А.В. Шаповалов, **В.И. Рязанов**, В.А. Шаповалов // Труды XXX Всероссийского симпозиума «Радиолокационное исследование природных сред». – Санкт-Петербург: ВКА им. А.Ф. Можайского. – 2017. – Вып. 12., Т. 2. – С. 131 – 134.

11. Рязанов, В.И. Трехмерная модель конвективного облака: исследование микроструктурных и электрических параметров / **В.И. Рязанов**, А.В. Шаповалов, В.А. Шаповалов // Сборник статей XIV Международной научно-практической конференции «Проблемы и перспективы современной науки». – 2017. – С. 97 – 100.

12. Рязанов, В.И. Математическое моделирование распространения примесей в ближней зоне при испытаниях ракетных двигателей / **В.И. Рязанов**, А.В. Шаповалов, З.Х. Гучаева, Ф.Х. Увижева, В.А. Шаповалов // Всероссийская конференция с международным участием «Устойчивое развитие: Проблемы, концепции, модели». – 2017. – С. 180 – 183.

13. Рязанов, В.И. Трехмерная модель конвективного облака: исследование микроструктурных и электрических параметров/ **В.И. Рязанов** // Сборник статей XIV Международной научно-практической конференции «Проблемы и перспективы современной науки». – 2017. – С. 97 – 100.

14. Рязанов, В.И. Трехмерная численная модель распространения примесей в атмосфере с детальным учетом метеорологических параметров / **В.И. Рязанов**, А.В. Шаповалов // Сборник статей XIII Международной научно-практической конференции «Динамика научных исследований. Проблемы научной мысли». – 2017. – № 7, том 1. – С. 49 – 58.

15. Рязанов, В.И. Исследование распространения газообразных примесей в атмосфере при запусках ракетополетов / **В.И. Рязанов** // Сборник научных работ XXIII Международной научной конференции «Наука и современность 2017», М: ЕНО. – 2017. – С. 10 – 12.

16. Рязанов, В.И. Исследование распространения примесей в приземном слое атмосферы при заданных полях метеорологических параметров / **В.И. Рязанов**, Р.В. Шереметьев // Сборник центра научных публикаций «Велес» по материалам IV Международной конференции «Инновационные подходы и современная наука». – Киев. – 2018. – ч. 1. – С. 50 – 57.

17. Рязанов, В.И. Численные оценки распространения загрязняющих веществ при испытаниях ракетных двигателей / **В.И. Рязанов**, Р.В. Шереметьев // Scientific discussion. – Чехия, Прага. – 2018. – № 17, том 1. – С. 55 – 60.

18. Рязанов, В.И. Модель распространения загрязняющих веществ в атмосферном воздухе с учетом данных метеорологических радиолокаторов / **В.И. Рязанов**, Р.В. Шереметьев // Сборник статей XXIX Международной научной конференции «Стратегии устойчивого развития мировой науки». – М.: ЕНО. – 2018. – № 5 (39). – С. 24 – 26.

19. Шаповалов, А.В. Программа численного моделирования распространения примесей в атмосфере с учетом метеорологических условий «МЗД-ДИФФ» / А.В. Шаповалов, В.А. Шаповалов, **В.И. Рязанов** // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. - Рег. № 2017617322 от 04.07.2017.

20. Рязанов, В.И. Использование данных глобальных прогнозных систем и радиолокационной информации доплеровских метеорологических радиолокаторов при расчетах распространения и вымывания примесей от ракетных двигателей / **В.И. Рязанов** // Сборник статей XXIX Международной научно-практической конференции «Фундаментальные и прикладные научные исследования: актуальные вопросы, достижения и инновации», в 2 ч. Ч. 1. – Пенза: МЦНС «Наука и Просвещение». – 2019. – С. 20-23

21. Рязанов, В.И. Трехмерная численная модель распространения примесей в пограничном слое атмосферы с учетом локальных метеопараметров / **В.И. Рязанов**, В.А. Шаповалов, Е.А. Ковалев, А.В. Шаповалов // Сборник статей 69-й Международной научно-практической конференции Евразийского научного объединения «Научные исследования и разработки». - М.: ЕНО. – 2020. – № 11 (69). – С. 29 – 31.

В работах, опубликованных в соавторстве, лично автору принадлежат следующие результаты:

- в [3, 7, 8, 9, 13, 18, 20] – создание алгоритмов и программы, позволяющей вести расчеты по модели распространения примесей при различных условиях в атмосфере;

- в [1, 2, 4, 6] – создание алгоритмов и методов обработки, анализа и комплексирования данных моделирования с целью выявления опасных ситуаций при РКД;

- в [5, 11, 14, 15, 19, 21] – разработка и реализация алгоритмов численной модели распространения примесей в части микрофизического блока модели и учета метеопараметров, постановка и проведение численных экспериментов;

- в [10, 16, 17] – постановка и исследование результатов численных экспериментов на основе модели распространения примесей от мощного кратковременного источника.