

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего
образования «Национальный исследовательский технологический университет
«МИСиС»

На правах рукописи

ОРЁЛКИНА ДАРЬЯ ИВАНОВНА

**ИССЛЕДОВАНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ И РАСПРОСТРАНЕНИЯ В
АТМОСФЕРЕ ВТОРИЧНЫХ ЗАГРЯЗНИТЕЛЕЙ С ЦЕЛЬЮ ПОСТРОЕНИЯ
КОНЦЕНТРАЦИОННЫХ ПОЛЕЙ ВРЕДНЫХ ЛЕТУЧИХ КИСЛОТ ВО
ВНЕШНЕЙ ЗОНЕ ВЛИЯНИЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРЕДПРИЯТИЙ**

Специальность 05.16.07:

«Металлургия техногенных и вторичных ресурсов»

Диссертация
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор физико-математических наук,
профессор
Петелин Александр Львович

МОСКВА, 2016

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
1 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ	13
1.1 Загрязнение атмосферы.....	14
1.1.1 Характеристика источников выбросов загрязняющих веществ.	14
1.2 Нормативы загрязнения атмосферного воздуха	15
1.2.1 Норма выбросов	15
1.2.2 Предельно допустимая концентрация	16
1.2.3 Показатели загрязнения атмосферного воздуха.....	19
1.3 Вклад металлургического производства в загрязнение атмосферы	22
1.3.1 Коксохимическое производство	24
1.3.2 Агломерационное производство	27
1.3.3 Доменное производство	28
1.3.4 Мартеновское производство	29
1.3.5 Электросталеплавильное производство	31
1.3.6 Конвертерное производство	31
1.3.7 Ферросплавное производство	32
1.3.8 Литейное производство.....	33
1.3.9 Прокатное производство	33
1.4 Основные компоненты первичных газовых выбросов металлургических предприятий	34
1.4.1 Оксид углерода (II)	36
1.4.2 Оксид углерода (IV).....	37
1.4.3 Диоксид серы	39
1.4.4 Сульфид водорода	40
1.4.5 Оксид азота (II)	41
1.4.6 Оксид азота (IV)	42
1.5 Образование кислот в атмосфере	43

1.5.1	Кислотообразующие компоненты атмосферы.....	43
1.5.1.1	Образование низших карбоновых кислот	43
1.5.1.2	Источники серной кислоты.....	45
1.5.1.3	Источники азотной кислоты	46
1.5.1.4	Концентрации кислотообразующих компонентов в атмосфере ..	48
1.5.2	Механизмы образования кислот из первичных газовых выбросов.	51
1.5.2.1	Соединения серы	51
1.5.2.2	Оксиды азота	57
1.5.2.3	Образование низших карбоновых кислот	58
1.6	Мониторинг	59
1.6.1	Мониторинг источников	60
1.6.2	Импактный мониторинг.....	60
1.6.3	Региональный мониторинг.....	61
1.6.4	Фоновый мониторинг	61
	Заключение по главе 1	62
2	МОДЕЛИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВЫБРОСОВ.....	64
2.1	Анализ математических моделей распространения примесей от стационарных источников	64
2.1.1	Дисперсионные модели	64
2.1.1.1	Классификация моделей загрязнения воздуха	65
2.1.1.2	Модели рассеивания в локальном масштабе	66
2.1.1.3	Модели рассеивания в региональном масштабе	67
2.1.1.4	Модели рассеивания в континентальном масштабе.....	67
2.1.2	Рецепторные модели.....	68
2.1.2.1	Модель химического баланса массы.....	69
2.1.2.2	Многовариантная рецепторная модель.....	69
2.1.2.3	Нейронные модели.....	70
2.1.3	Статистические модели качества воздуха	70

2.1.3.1	Модели оперативной оценки	71
2.1.3.2	Эмпирические модели: прогнозирование загрязнения воздуха	71
2.2	Программные модели, реализованные на практике	72
2.2.1	Зарубежные модели распространения выбросов от стационарных источников	72
2.2.2	Модели распространения выбросов, разработанные в РФ	78
2.2.2.1	ОНД-86	79
2.2.2.2	Модель распространения первичных выбросов во внешней зоне влияния металлургического предприятия, основанная на принципе максимальной опасности.....	80
	Заключение по главе 2	85
3	ВТОРИЧНЫЕ ЗАГРЯЗНИТЕЛИ. ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ. СПОСОБ ЧИСЛЕННОГО РАСЧЕТА	87
3.1	Развитие модели первичных выбросов	87
3.2	Основные положения модели образования и распространения вторичных загрязнителей.....	92
3.2.1	Зоны влияния металлургических предприятий	92
3.2.2	Принцип максимальной опасности	95
3.2.3	Факторы определения концентрации	96
3.2.4	Непрерывный пространственно-распределенный источник	99
3.3	Численная модель образования и распространения вторичных загрязнителей.....	101
3.4	Результаты численного расчета поля концентраций вторичных загрязнителей ММК	104
4	КИНЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СТАЦИОНАРНОГО ПОЛЯ КОНЦЕНТРАЦИЙ ВТОРИЧНЫХ ЗАГРЯЗНИТЕЛЕЙ	114
4.1	Основы кинетики для стационарного поля распределения	114

4.2	Кинетическая модель образования и распространения вторичных загрязнителей.....	115
4.3	Сравнение с численным расчетом	116
4.4	Критические параметры, числа	119
5	РАСЧЕТ ПОЛЕЙ КОНЦЕНТРАЦИЙ ДЛЯ КОНКРЕТНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ....	120
5.1	Распределение вторичных загрязнителей предприятия НЛМК	120
5.1.1	Распределение азотной кислоты	121
5.1.2	Распределение серной кислоты.....	126
5.2	Распределение вторичных загрязнителей предприятия ЧерМК.....	131
5.2.1	Распределение азотной кислоты	132
5.2.2	Распределение серной кислоты.....	137
5.3	Распределение вторичных загрязнителей предприятия ММК.....	141
5.3.1	Распределение азотной кислоты	141
5.3.2	Распределение серной кислоты.....	146
	ВЫВОДЫ.....	151
	СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ.....	153
	СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	155
	ПРИЛОЖЕНИЕ А. МОДЕЛИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВЫБРОСОВ.....	168

ВВЕДЕНИЕ

Увеличение выбросов вредных веществ в атмосферу с начала эпохи индустриализации привело к повышенному содержанию примесей в атмосферном воздухе даже на значительном удалении от крупных промышленных центров. В условиях постоянного роста промышленного производства, а соответственно и увеличения количества выбросов загрязняющих веществ, важнейшей проблемой современности является охрана окружающей среды. Контроль качества воздуха одна из главных составляющих этой общей проблемы. Изменение состава воздуха отражается не только на здоровье людей, но и на всех без исключения природных объектах и на объектах культуры нашей цивилизации.

Основными антропогенными источниками загрязнения атмосферы являются промышленные предприятия, транспорт и бытовые источники. Среди всех отраслей промышленности металлургическая отрасль занимает второе место по выбросам вредных веществ в атмосферу. Проблема распространения в атмосфере газообразных выбросов имеет особое значение в металлургии. Зачастую в промышленных регионах крупные металлургические предприятия являются основными источниками газообразных выбросов, превышая суммарные выбросы всех остальных стационарных источников, становясь, таким образом, главной экологической проблемой региона.

Основную часть выбросов вредных веществ, поступающих в атмосферу от металлургических предприятий, составляют вещества повышенной токсичности, они негативным образом влияют на здоровье людей и окружающую природу. Однако не меньшую опасность представляют вещества, являющиеся продуктами реакций газовых выбросов с компонентами атмосферы, то есть вторичные загрязнители, или вторичные выбросы. Первичные выбросы серосодержащих и азотосодержащих веществ являются прямыми предшественниками вторичных токсичных веществ, сильных летучих кислот. Распространение этих кислот, то есть вторичных выбросов, зачастую опаснее, чем первичных.

Вторичные загрязнители могут распространяться в приземных слоях атмосферы на значительные расстояния от металлургического комбината. В зависимости от характеристик источника выброса и метеорологических данных, концентрации компонентов выбросов могут значительно превышать значения предельно допустимые концентрации. Мониторинг вторичных загрязнителей на региональном уровне достаточно затруднителен по причине отсроченного влияния и сложности определения прямой связи с конкретным источником первичных выбросов. Прогнозирование концентраций вторичных загрязнителей гораздо более сложный процесс, чем прогнозирование первичных; в их поведении меньше явных закономерностей, они менее предсказуемы. До сих пор нет однозначного ответа на вопросы: как распределяются в пространстве и где накапливаются отдельные компоненты вторичных загрязнителей. Особенно это важно для металлургической отрасли, постоянно выбрасывающей в окружающее воздушное пространство большое количество газообразных первичных вредных веществ. Поэтому работа в этом направлении является актуальной.

Для предупреждения последствий, которые могут вызывать вторичные вещества, образующиеся в атмосфере в результате химической активности газовых выбросов металлургических предприятий, необходим анализ общей картины образования и распространения вторичных загрязнителей в атмосфере промышленных регионов и определение максимального риска превышения концентраций во внешней зоне влияния металлургических центров.

Следует обратить внимание, что климатические и географические характеристики региона расположения предприятия формируют индивидуальные зоны влияния каждого металлургического комбината. Поэтому при анализе распространения вторичных загрязнителей требуется рассмотрение каждого металлургического комбината в отдельности.

Оценка концентрационного поля вторичных загрязнителей в промышленном регионе, позволит проанализировать последствия изменения технологий производства или сырьевой базы металлургических предприятий, влияющих на концентрацию выбросов загрязняющих веществ. Это также может

способствовать более полному анализу результатов воздействия проектируемых предприятий на экологию окружающих их районов.

Степень разработанности темы. В настоящее время в литературе уделяется большое внимание разработке и усовершенствованию методов и моделей расчета распространения газовых выбросов. В работе приведен обзор основных программных продуктов прогнозирования и моделирования распространения примеси в атмосфере, распространенные за рубежом и основанные, по большей части, на гауссовом, лагранжевом, эйлеровом алгоритмах расчета, а так же методика ОНД-86, являющаяся основой многих российских моделей. В результате анализа моделей распространения выбросов установлено, что на практике моделирование процессов распространения примеси связано с большим числом факторов и требует значительных вычислительных ресурсов, прежде всего это связано с необходимостью решать системы уравнений большой размерности. В России и за рубежом существуют методики расчета изменения концентрации вторичных загрязнителей от времени, без привязки к конкретным координатам на местности. Таким образом, среди всего многообразия существующих и реализованных на практике моделей распространения выбросов от стационарных источников нет моделей, предназначенных для анализа пространственного распределения вторичных загрязнителей в зависимости от удаленности от источника, в том числе отсутствуют методики расчета вторичных выбросов, предназначенные непосредственно для металлургических предприятий.

Цель работы: Разработка модели образования и распространения вторичных загрязнителей во внешней зоне влияния металлургических предприятий и расчет полей-концентраций вторичных загрязнителей для конкретных предприятий черной металлургии.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Используя имеющиеся схемы расчета первичных выбросов металлургических предприятий и данные мониторинга, разработать принципиальные основы моделирования процессов образования и распространения вторичных загрязнителей.
2. Построить математическую модель расчета поля концентраций вторичных загрязнителей для предприятий металлургической отрасли.
3. Провести физико-химическое обоснование способа расчета поля концентраций вторичных загрязнителей, используемого в математической модели.
4. Произвести расчет полей концентраций компонентов вторичных загрязнителей для нескольких крупных металлургических комбинатов по имеющимся фактическим данным о количестве первичных выбросов в атмосферу.

Научная новизна работы:

1. Разработан принцип непрерывного пространственно-распределенного источника вторичных загрязнителей металлургического происхождения, основой которого является постоянное появление вторичного вещества в каждой точке стационарного поля концентраций первичных выбросов и перенос образовавшегося вторичного вещества по направлению ветра. На основе этого принципа предложен общий метод расчета поля концентраций вторичных загрязнителей во внешней зоне влияния предприятий.
2. Предложен физико-химический механизм, описывающий возникновение стационарного поля концентрации вторичного вещества (опасной летучей кислоты), заключающийся в протекании двух параллельных окислительно-восстановительных процессов, ведущих к образованию вторичного вещества (с одной стороны) и к его гибели (с другой) и происходящих при движении всех реагирующих веществ с заданной скоростью с потоком воздуха в атмосфере.
3. Впервые установлено наличие максимума концентрации вторичного вещества на значительном удалении от источника выбросов при использовании предложенного метода расчета полей концентраций вторичных загрязнителей.

Местоположение (удаленность от источника) и значение максимума однозначно определяются разработанным методом расчета.

4. Предложен способ прогнозирования зон максимальной опасности с помощью построения пространственного поля концентраций летучих кислот металлургического происхождения в географических регионах, содержащих металлургические предприятия.

Практическая значимость: Предложен способ построения прогнозных географических карт-схем распределения вторичных токсичных веществ на местности. Разработанный метод реального прогноза максимального уровня опасности металлургических газовых выбросов (в том числе летучих кислот) во внешней зоне влияния предприятий готов к применению на практике на любом металлургическом комбинате. Это необходимо для обеспечения безопасности населения, проживающего как в непосредственной близости, так и достаточно далеко от самого предприятия.

Методология и методы исследования. В работе для решения поставленных задач были использованы физико-химические подходы, в том числе с использованием моделей газовой диффузии, модели Фишера. В моделях пространственного распределения вторичных газовых выбросов металлургических предприятий применяются принципы химической кинетики.

Положения, выносимые на защиту:

- общий механизм пространственного превращения компонентов первичных газовых выбросов металлургических предприятий во вторичные вещества (вторичные выбросы), основанный на принципе непрерывного пространственного распределенного источника;
- алгоритм численного расчета, позволяющий производить расчет полей концентрации вторичных веществ металлургического происхождения во внешних зонах влияния металлургических центров;

- получение функции распределения концентраций вторичных веществ в пространстве, общий вид этой функции, способ определения положения максимальной концентрации и его удаленности от места поступления в атмосферу первичных выбросов;
- физико-химический механизм пространственного превращения первичных газовых выбросов во вторичные вещества и его аналитическое решение; сравнение результатов расчета, полученных численным аналитическим способом;
- общий метод расчета пространственного распределения первичных и вторичных металлургических газовых выбросов для получения ежемесячных прогнозов расположения территорий с максимально возможным уровнем концентраций вредных компонентов выбросов;
- построение карт-схем расположения зон максимальной опасности распределения концентраций вторичных летучих кислот – HNO_3 и H_2SO_4 для трех металлургических комбинатов полного цикла: НЛМК, ЧерМК и ММК.

Достоверность результатов подтверждается имеющимися данными мониторинга концентраций летучих кислот, определения скоростей их распространения и временами жизни в крупных промышленных Европейских и Североамериканских регионах с развитой теплоэнергетикой. Необходимая информация приведена в обзоре литературы.

Текст диссертации и автореферат проверены на отсутствие плагиата с помощью программы «Антиплагиат» (<http://antiplagiat.ru>).

Апробации работы.

Результаты работы доложены и обсуждены на следующих конференциях: 14TH GEOCONFERENCE SGEM 2014, 17 – 26 June, 2014, Albena Resort, Bulgaria; XI Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «Современные проблемы горно-металлургического комплекса. Наука и производство». 3-5 декабря 2014г., г.Старый Оскол; Международная научно-

практическая конференция «Комплексное использование вторичных ресурсов и отходов (рециклинг отходов): опыт реализации инновационных проектов в рамках федеральных целевых программ Минобрнауки России». 4-5 декабря 2014 г., г. Москва; Computer modeling in science and technology, 17-28 December, 2014, Dominican Republic

Публикации.

По материалам работы опубликовано 7 научных работ, все из них опубликованы в журналах, входящих в базу РИНЦ, из них 4 статьи в журналах, рекомендованных ВАК, 4 статьи в журналах, входящих в базу Scopus, 3 статьи в журналах, входящем в российскую базу цитирования на платформе Web of Science (Russian Science Citation Index) и зарегистрировано НОУ-ХАУ «Методика расчета распространения газовых выбросов металлургических предприятий во внешней зоне влияния» (Зарегистрировано в Депозитарии ноу-хау НИТУ "МИСиС" №6-001-2016 ОИС от 14.03.2016г.).

Структура и объем работы. Диссертация содержит введение, 5 глав, общие выводы, список публикаций по теме диссертации, список используемой литературы. Работа изложена на 174 страницах машинописного текста, содержит 36 таблиц, 31 рисунок. Список используемой литературы включает 109 наименований.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ, соглашение № 14.278.21.0065 от 20.10.2014, уникальный идентификатор соглашения RFMEFI57814X0065.

1 Обзор литературы

Среди всех отраслей промышленности металлургическая отрасль занимает второе место по выбросам вредных веществ в атмосферу. В технологическом цикле металлургического производства на стадиях обогащения и плавки поступает огромный объем руды с очень низким содержанием полезных компонентов, такое сырье является причиной образования больших объемов отходящих газов из неиспользуемых компонентов. Кроме того, современные металлургический комплекс нашей страны недооценивает энергетические возможности металлургических технологий, это мешает снижению энергоемкости и уменьшению количества выбросов в окружающую среду при производстве чугуна и стали. Именно загрязнение окружающей среды, в частности атмосферы, является главной экологической проблемой, возникающей в результате деятельности металлургических предприятий полного цикла.

Как следует из [1], на черную и цветную металлургию приходится около одной трети всех промышленных газовых выбросов, в то время как на продукцию металлургических предприятий приходится лишь 17% от общего объема промышленного производства. Основным загрязнителем атмосферы у предприятий черной металлургии является оксид углерода, в воздух его поступает около 1,5 млн. тонн в год [2]. При производстве цветных металлов выбрасывается огромное количество диоксида серы: 2,5 млн. тонн ежегодно [3]. Больше всего влиянию этих выбросов подвержены жители крупных металлургических центров. Для некоторых регионов наличие металлургического предприятия является главной, если не единственной экологической проблемой. К примеру, Новолипецкий металлургический комбинат является источником 88% всех газовых выбросов вредных веществ в Липецкой области. Такие крупные металлургические центры как Кемерово, Липецк, Магнитогорск и Новокузнецк, включены в список городов с наибольшим уровнем загрязнения атмосферного воздуха [4].

1.1 Загрязнение атмосферы

Под загрязнением атмосферы понимается процесс введения в воздух или образование в нем химических веществ, имеющих вредное воздействие и наносящих урон окружающей среде [5].

Главными источниками загрязнения воздушной среды являются топливно-энергетические предприятия, предприятия обрабатывающей промышленности и транспорт. Более 80% всех загрязняющих веществ, поступающих в атмосферу от этих источников, составляют оксиды углерода и азота, диоксид серы, углеводороды и твердые веществ [6].

1.1.1 Характеристика источников выбросов загрязняющих веществ.

Источники выбросов загрязняющих веществ в атмосферу в зависимости от формы подразделяются на четыре вида:

- Точечный источник – организованный одинарный источник выбросов загрязняющих веществ в атмосферу (например, дымовые трубы, вентиляционные шахты). Точечные источники, как правило, характеризуются какой-либо высотой над уровнем земли. Точечный источник не имеет геометрических размеров.
- Линейный источник - одномерный источник выбросов загрязняющих веществ в атмосферу (например, выбросы от автомобильного движения на проезжей части).
- Площадный источник - двумерный источник выбросов загрязнителей воздуха (например, выбросы из лесных пожаров, свалка или испаряющиеся пары из большого разлива летучей жидкости).
- Объемный источник - трехмерный источник выбросов загрязняющих веществ в атмосферу. По сути, это площадный источник с третьей размерностью, высотой (например, летучие газообразные выбросы от трубопроводных фланцев, клапанов и другого оборудования на различных высотах внутри промышленных объектов, таких как нефтеперерабатывающие и нефтехимические заводы).

Другим примером может служить выбросы от автомобильного окрасочного цеха с несколькими вентиляционными отверстиями на крыше или несколькими открытыми окнами.

Другой характеристикой источников газовых выбросов является стационарность:

- Стационарный источник имеет постоянную во времени координату. К таким источникам относятся, например, дымовые трубы.
- Мобильный источник – это нестационарный, передвижной источник, например, автотранспорт.

По высоте источники подразделяются на наземные (менее 2 метров), низкие (от 2 до 10 метров), источники средней высоты (от 10 до 50 метров) и высокие (более 50 метров).

По продолжительности источники подразделяются на прерывистые или краткосрочные, к ним относятся, например аварийные выбросы, и непрерывные (долгосрочные) источники (дымовые трубы промышленных предприятий).

1.2 Нормативы загрязнения атмосферного воздуха

1.2.1 Норма выбросов

Норма выбросов газообразных веществ – суммарное количество вредных веществ, разрешаемое предприятию для выброса в атмосферу. Нормы выбросов устанавливают количественные ограничения на допустимый объем конкретных загрязнителей воздуха, которые могут быть освобождены от конкретных источников в конкретных временных интервалах. Они, как правило, предназначены для достижения стандартов качества воздуха и для защиты здоровья человека.

Некоторые стандарты выбросов сосредоточены на регулировании загрязняющих веществ, выбрасываемых автомобилями (двигателями автомобилей) и другими транспортными средствами. Другие регулируют

выбросы от промышленных объектов, электростанций, малогабаритного оборудования, таких как газонокосилки и дизель-генераторы, а также других источников загрязнения воздуха.

1.2.2 Предельно допустимая концентрация

Предельно допустимая концентрация (ПДК) - утвержденный на законодательном уровне в Российской Федерации санитарно-гигиенический норматив. Под ПДК понимается максимальный уровень концентрации химических элементов и их соединений в окружающей среде, который при повседневном воздействии на организм человека в течение длительного времени не вызывает патологических изменений или заболеваний, которые могут быть установлены современными методами исследований во все периоды жизни нынешних и будущих поколений [7]. На состояние растений и животных может повлиять концентрация веществ значительно ниже значения ПДК. Например, уровень загрязнения воздуха диоксидом серы в 10 раз ниже ПДК вызывает хроническое или кратковременное поражение листьев растений, медленный рост, снижение урожайности. ПДК является главным критерием экологического нормирования уровня токсичных веществ в окружающей среде.

Значения ПДК включены в государственные стандарты, санитарные нормы и другие нормативные акты, которые являются обязательными на всей территории государства; они принимаются во внимание при проектировании процессов, оборудования, очистных сооружений и т.д. Санитарно-эпидемиологические службы в порядке санитарного контроля систематически следят за соблюдением стандартов ПДК в водоемах с питьевой водой, в атмосферном воздухе и в воздухе производственных помещений (рабочей зоны).

В зависимости от объекта исследования, содержащего то или иное загрязняющее вещество, ПДК определяется в различных единицах измерения: в воде - в миллиграммах на кубический дециметр (мг/дм³); в в атмосферном

воздухе или воздухе рабочей зоны - в миллиграммах на кубический метр (мг/м³);
в почве - в миллиграммах на килограмм (мг/кг).

Установления количественных предельных значений

Изначально предельно допустимые концентрации веществ в окружающей среде были установлены из принципа "отсутствия практического влияния на здоровье человека". Однако это определение является слишком расплывчатым и вводит в заблуждение, поскольку не учитывает долгосрочные последствия отрицательных воздействий. Некоторые канцерогенные вещества (например, вещества, которые вызывают рак), опасны в любой концентрации, но их эффект проявляется иногда через много лет.

Для установления значений ПДК используются вычислительные методы, результаты биологических экспериментов над животными, а также материалы наблюдения за состоянием здоровья лиц, подвергшихся воздействию вредных веществ. Значения ПДК, установленные на основании экспериментальных данных о токсичности и других показателях не одинаковы в разных странах и периодически пересматриваются. В последнее время широко используется метод компьютерного моделирования, прогнозирования биологической активности новых веществ, биологических испытаний на различных объектах. В Соединенных Штатах для установления значения предельно допустимой максимально разовой концентрации (ПДК_{мр}) пыли в угольных шахтах использовался анализ многочисленных исследований профессиональных заболеваний и гибели шахтеров. Рост количества профессиональных заболеваний побудил уменьшить ПДК_{мр} и ужесточить контроль над соблюдением нормативов.

Разновидности ПДК

При санитарной оценке состояния воздушной среды используют ПДК_{рз}, которая представляет собой предельно-допустимую концентрацию вредных веществ в воздухе рабочей зоны (производственного помещения). Пространством рабочей зоны принято считать место временного или постоянного пребывания работников высотой до двух метров над уровнем пола. Концентрация веществ,

находящихся в этом пространстве, не должна вызывать болезни или какие-либо отклонения в состоянии здоровья, которые могут быть обнаружены с помощью современных методов исследования. Человек должен оставаться здоровым на всем протяжении службы и даже после окончания стажа работы, при условии, что воздух, содержащий некоторые концентрации потенциально вредных соединений, будет вдыхаться каждый рабочий день в течение 8 часов рабочего времени [8].

Существует так же предельно-допустимая концентрация вредных веществ на промышленном предприятии (на площадке предприятия) – ПДКп.п. Как правило, значение ПДКп.п. принимается равным 0,3 ПДКрз.

Для населенных пунктов существуют другие количественные нормативы содержания химических соединений в атмосфере. Во-первых, это ПДКн.п. - предельно допустимая концентрация вредных веществ в воздухе населенного пункта. Причем, для населенных пунктов выделяю отдельно среднесуточную и максимально разовую ПДК.

ПДКм.р. - максимальная разовая концентрация токсичных веществ в воздухе населенных мест. ПДКм.р. не должна вызывать рефлекторные реакции в организме человека (ощущение присутствия запаха, световой чувствительности глаз и так далее) при кратковременном воздействии загрязнителя (в течение 20 мин) [8].

ПДКс.с. - предельно допустимая среднесуточная концентрация вредных токсичных веществ в воздухе населенных мест. ПДКс.с. не должна оказывать вредного воздействия (общетоксического, канцерогенного и др.) при условии вдыхания в течение суток (усреднение проводится в течение 24 часов) [8].

При установлении ПДКр.з. и ПДКн.п. учитывается различие в характере воздействия вещества на организм человека в производственной среде и в населенных пунктах. В рабочей области при определении влияния вещества принимается, что в помещении находятся здоровые взрослые люди, время воздействия ограничивается длиной рабочего дня и стажем работы. При определении ПДКн.п. учитываются другие факторы. В населенных пунктах вещества воздействуют на протяжении всей жизни на людей всех категорий

(детей и взрослых, здоровых и больных). Следовательно, для одних и тех же вредных веществ значения ПДК_{кр.з.} и ПДК_{н.п.} могут отличаться в десятки и даже сотни раз.

Из недостатков санитарно-гигиенического нормирования (установление ПДК) можно выделить то, что оно не достаточно отражает комбинированное действие (одновременное или последовательное) нескольких веществ при одинаковом или различном путях поступления (с воздухом, водой, пищей, через кожный покров) и сочетательного воздействия всего многообразия физических, химических и биологических факторов окружающей среды. Существуют лишь ограниченное количество веществ, обладающих эффектом суммации при их одновременном содержании в атмосферном воздухе.

1.2.3 Показатели загрязнения атмосферного воздуха

В настоящее время в РФ используются три показателя качества воздуха [9]:

ИЗА — комплексный индекс загрязнения атмосферы, позволяет учитывать концентрации нескольких примесей. Эта величина характеризует уровень загрязнения воздуха за длительный период времени. ИЗА рассчитывается по суммарным значениям среднегодовых концентраций примесей, измеренных в городе.

Комплексный ИЗА учитывает вредность воздействия вредных веществ на здоровье человека, он рассчитывается по формуле:

$$\text{КИЗА} = \sum \left(\frac{q_i}{\text{ПДК}_{\text{с.с.}i}} \right)^C, \quad (1)$$

где q_i — среднегодовая концентрация i -й примеси,

$\text{ПДК}_{\text{с.с.}i}$ — ПДК_{с.с.} i -й примеси,

C — безразмерный коэффициент, отражающий степень вредности примеси, приведенный к степени вредности диоксида серы.

СИ — стандартный индекс, максимальная измеренная разовая концентрация загрязняющего вещества, деленная на значение ПДК. В отличие от

ИЗА, СИ характеризует уровень кратковременного загрязнения. СИ определяется из данных мониторинга за одной или всеми примесями. □

НП — наибольшая повторяемость превышения ПДКм.р. любым загрязнителем по данным мониторинга за месяц или за год.

Оценить уровень загрязнения атмосферы по вышеописанным показателям качества воздуха можно с помощью следующей классификации уровней загрязнения:

- низкий (Н), если $СИ < 1$, $НП < 10$, $ИЗА < 5$;
- повышенный (П) при $5 < СИ \leq 1$ или $20 < НП \leq 10$ или $7 < ИЗА \leq 5$;
- высокий (В) при $10 < СИ \leq 5$, или $50 < НП \leq 20$, или $14 < ИЗА \leq 7$;
- очень высокий (ОВ) если $СИ \geq 10$, или $НП \geq 50\%$, или $ИЗА \geq 14$.

Критерии качества атмосферного воздуха или стандарты концентрации загрязняющих веществ в воздухе, установленные в России, США, ЕС или ВОЗ зачастую, но не всегда имеют одинаковые значения или один порядок величины, даже если они были рекомендованы для одной цели (например, для защиты здоровья человека). В таблице 1 приведено сравнение ПДК, установленных в РФ, и критериев качества атмосферного воздуха, установленных Всемирной Организацией Здравоохранения (ВОЗ), а так же в США и ЕС [10].

Таблица 1 – Предельно допустимые концентрации основных загрязняющих веществ в РФ и критерии качества атмосферного воздуха в ЕС, США и ВОЗ

Загрязняющее вещество	Время осреднения	Россия, мг/м ³	ВОЗ, мг/м ³	США, мг/м ³	ЕС, мг/м ³
1	2	3	4	5	6
СО	15 мин.	-	100	-	-
	30 мин.	5	60	-	-
	1 час	-	30	40 Превышение не чаще одного раза в год	-
	8 часов	-	10	10 Превышение не чаще одного раза в год	10
	24 часа	3	-	-	-

Продолжение таблицы 1

1	2	3	4	5	6
NO ₂	30 мин	0,2	-	-	-
	1 час	-	0,2	0,19 98 процентиль 1-часовой суточной максимальной концентрации, усредненной за 3 года	0,2 Превышение не более чем 18 раз за год
	24 часа	0,04	-	-	
	Средняя за год	-	0,04	0,1 Среднегодовое значение	0,04
O ₃	30 мин.	0,16	-	-	-
	1 час	-	-	-	-
	8 часов	-	0,10	0,15 Годовая четвертая по величине суточная 8-часовая максимальная концентрация, усредненная за 3 года	0,12 Превышение не более чем 25 дней в среднем за 3 года
	24 часа	0,03	-	-	-
SO ₂	10 мин	-	0,5	-	-
	30 мин	0,5	-	-	-
	1 час	-	-	0,199 99 процентиль 1-часовой суточной максимальной концентрации, усредненной за 3 года	0,350 Превышение не более чем 24 раз за год
	3 часа	-	-	1,33 Превышение не чаще одного раза в год	
	24 часа	0,05	0,02		0,125 Превышение не более чем 3 раза за год
	Средняя за год	-	0,05		0,02
PM ₁₀	30 мин.	0,3	-	-	-
	24 часа	0,06	0,05	0,15 Превышение не чаще одного раза в год по среднему за 3 года	0,05 Превышение не более чем 35 раз за год
	Средняя за год	-	0,02		0,04

1.3 Вклад металлургического производства в загрязнение атмосферы

В экономике любой страны металлы занимают исключительно важное место. В то же время металлургия, в частности черная, является мощнейшим загрязнителем окружающей среды (ОС).

В городах, где присутствуют крупные металлургические комбинаты, наблюдается неблагоприятная экологическая обстановка. В Магнитогорске большой вред окружающей среде наносит ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» (ММК), в Липецке - ПАО «Новолипецкий металлургический комбинат» (НЛМК), в Новокузнецке – ОАО «Новокузнецкий металлургический комбинат» (НКМК), в Нижнем Тагиле - ЕВРАЗ Нижнетагильский металлургический комбинат (ЕВРАЗ НТМК), в Череповце - ПАО «Северсталь» (череповецкая площадка – ЧерМК) и др [11].

Причинами вредного воздействия предприятий черной металлургии на окружающую среду являются следующие факторы:

- большинство предприятий находится в непосредственной близости к жилым районам в результате недооценки вредного воздействия металлургических предприятий при их размещении;
- использование изношенного технологического оборудования и устаревших технологий при производстве сталей и чугуна является причиной выбросов в атмосферу большего удельного количества загрязнителей по сравнению с современным производством;
- недостаточная оснащенность предприятий и отдельных агрегатов системами очистки выбросов или неэффективная работа этих систем и пыле- и газоочистных установок;
- наличие на предприятиях децентрализованных систем отвода газов является причиной наличия множественных источников загрязнения воздуха на приземном уровне.

Современное предприятие черной металлургии имеет следующие основные переделы: производство окатышей и агломерата, коксохимическое производство,

доменное производство, сталеплавильное и прокатное производства. Их основные назначения приведены на рисунке 2. Кроме того, в состав также могут входить ферросплавное, огнеупорное и литейное производства. Все они дают свой вклад в загрязнение атмосферы. На рисунке 1 приведен вклад конкретных цехов и производств ОАО «ММК» за 2005 год в общий объем газовых выбросов предприятия.

На самом деле процентный вклад отдельных цехов в общий объем выбросов может существенно отличаться у различных предприятий одной отрасли. Это связано с наличием тех или иных цехов, различием в сырьевой базе и технологиях производства, наличием усовершенствованного оборудования и др. Для определения какие цеха являются источниками наибольших выбросов, и какие вещества отступают от них в атмосферу, рассмотрим каждый вид производства и его воздействие на атмосферу по отдельности.

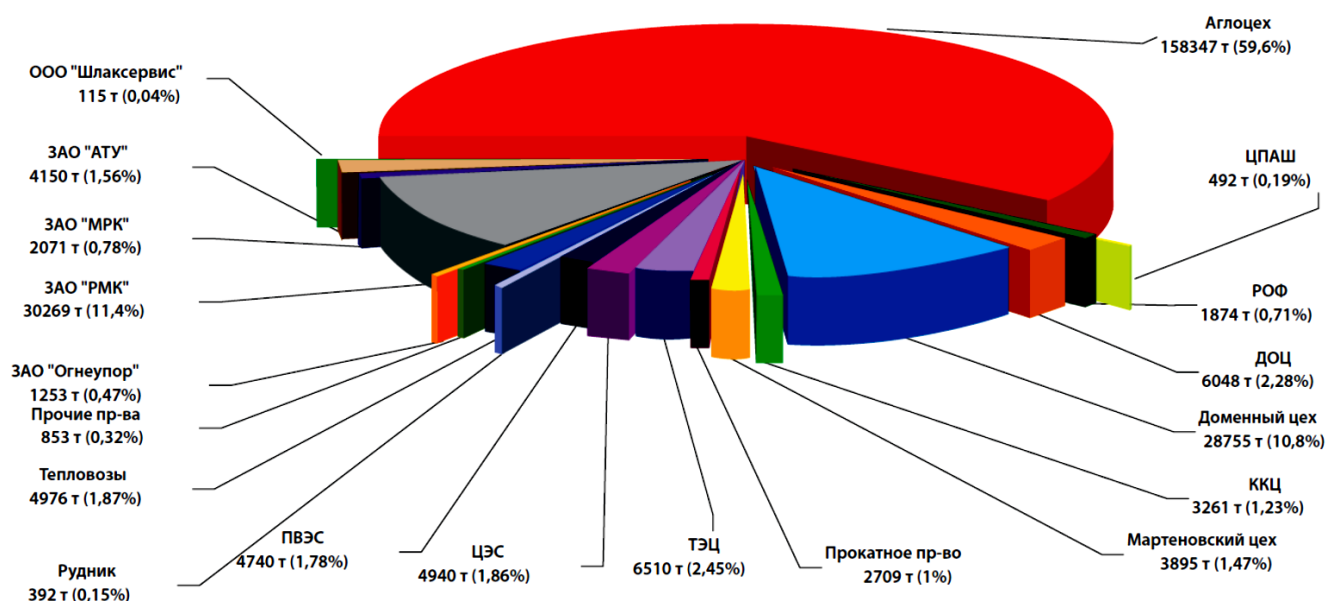


Рисунок 1 – Структура валовых выбросов по данным ММК за 2005 год



Рисунок 2 – Основные источники регламентированных газовых выбросов загрязняющих веществ металлургического предприятия и их назначение

1.3.1 Коксохимическое производство

В коксохимическом производстве источниками выбросов загрязняющих веществ являются главным образом отопительные системы коксовых печей, аспирационные системы цеха углеподготовки, системы загрузки кокса, системы выдачи кокса, тушения, коксосортировка, коксовые рампы.

Выбросы от коксохимического производства включают в себя стандартные загрязняющие вещества, такие как твердые частицы, диоксид серы, оксиды азота

и т.д., а так же многочисленные органические соединения, в том числе летучие (ЛОС).

На коксохимическом заводе, твердые частицы выделяются в атмосферу при разгрузке угля, его хранении и обработке; смешивании, дроблении и просеивании; во время коксования; выгрузки кокса из печи; дроблении кокса, обработки и хранения. При всем этом на 1 тонну перерабатываемого угля образуется примерно 3 кг угольной пыли [12]. ЛОС, диоксид серы, оксиды азота и окись углерода выделяются из печей. На 1 тонну угля приходится 0,75 кг диоксида серы, а так же углеводороды и аммиак. Органические соединения, растворимые в бензоле являются основными составляющими выбросов твердых частиц. Среди опасных органических загрязнителей воздуха присутствуют бензол, толуол, ксилол, цианистые соединения, нафталин, фенол, все они содержатся в коксовом газе. Значительное количество выбросов образуются в ходе вспомогательных операций.

В процессе коксования каменного угля, при нагревании его без доступа воздуха до 900—1100 °С, образуется коксовый газ, состоящий из паров воды, смол, легких масел (в основном бензол, толуол, ксилол), тяжелых углеводородов и других химических соединений. Сырой коксовый газ выходит из печи при температуре 760 °С до 870 °С и шокным путем охлаждается путем разбрызгивания распыленной воды. Этот спрей охлаждает газ до 80 °С до 100 °С, осаждая при этом смолу, конденсируя различные пары, и служит в качестве несущей среды для конденсатов. Эти продукты отделяются от жидкости в отстойнике и впоследствии обрабатываются для получения смолы и ее производных.

Затем газ пропускают через окончательный экстрактор смол или электрофильтр для дополнительного удаления смол. Когда газ выходит из экстрактора, он содержит три четверти аммиака и 95 процентов легких масел, первоначально присутствовавших в сыром коксовом газе. Аммиак извлекают либо в виде водного раствора путем абсорбции воды или в виде соли сульфата аммония. Сульфат аммония кристаллизуется в сатуратор, который содержит

раствор 5-10 процентной серной кислоты, а затем кристаллизованную соль удаляют, сушат и упаковывают для продажи.

Газ из сатуратора, выходящий при температуре примерно 60 °С, подается в холодильники или конденсаторы, где он, как правило, охлаждается до температуры около 24 °С, и где удаляются конденсаты (например, вода, бензол, нафталин) [13]. Затем газ проходит в бензольный скруббер, который использует тяжелую нефтяную фракцию в качестве очищающей среды, чтобы поглотить легкие масла. Промывочное масло удаляет около 95 процентов легких масел из газа. Обогащенное промывочное масло разделяют в паровом десорбер. Легкие фракции нефти могут быть проданы в виде сырой нефти или обработки с целью извлечения бензола, толуола, ксилола и сольвент-нафта. После того, как смола, аммиак и легкие масла удалены, газ проходит окончательную десульфурацию для удаления сероводорода [14]. Коксовый газ имеет теплотворную способность около 20 МДж/м³. Как правило, от 35 до 40 процентов газа возвращается в батарею в качестве топлива для системы сгорания, а остальная часть используется для других отопительных нужд, продается или в некоторых случаях сжигается [15].

В настоящее время существует три вида коксохимических цехов:

1. Цеха с отсутствием каких-либо мероприятий по защите атмосферного воздуха.
2. Цеха с беспылевой загрузкой угольной шихты, очисткой газа от сероводорода и очисткой сточных вод перед использованием на тушении кокса.
3. Цеха с беспылевой загрузкой шихты, очисткой газа и беспылевой выдачей кокса.

В таблице 2 приведены выбросы с учетом коэффициента агрессивности для цехов различных типов согласно данным [12].

Таблица 2 – Приведенные удельные выбросы вредных веществ в атмосферу при производстве кокса (2010г.), усл. г/т кокса

Компоненты	Коэффициент агрессивности А	Цех 1-го типа	Цех 2-го типа	Цех 3-го типа
Пыль	100	59670,0	41670,0	31020,0
Оксид углерода	1	164,5	143,8	143,8
Оксиды азота	41,1	5199,2	3571,6	3571,6
Диоксид серы	16,5	45361,8	8703,8	8703,8
Сероводород	41,1	1469,3	248,7	248,7
Аммиак	4,6	503,7	391,9	391,9
Цианистый водород	282	3905,7	987,0	987,0
Бензол	11,0	470,3	94,0	94,0
Фенол	310	36766,0	744,0	744,0
Нафталин	64,4	1014,3	290,0	290,0
3,4-бензпирен	$12,6 \cdot 10^5$	19120,5	14616,0	10250,0
Итого	-	173645,3	71460,8	56444,8

1.3.2 Агломерационное производство

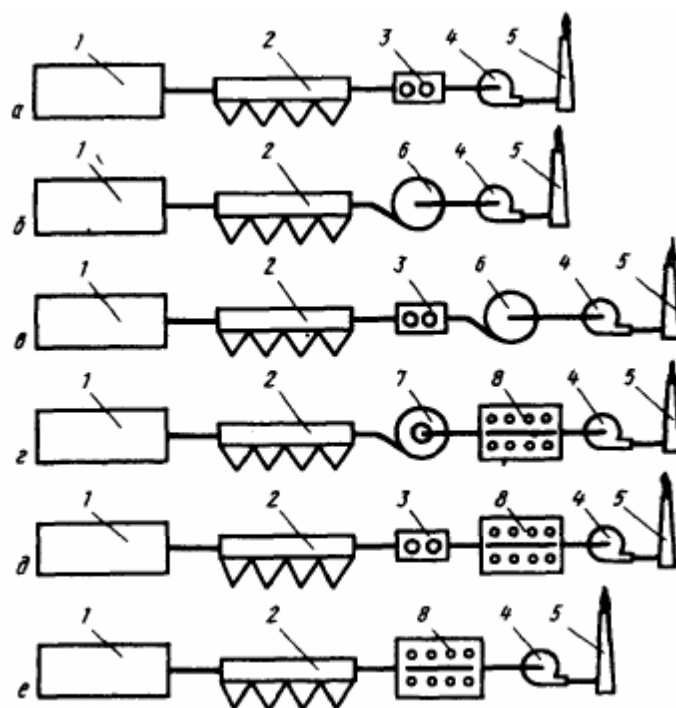
Агломерационное производство является основным источником загрязнения воздуха на предприятиях черной металлургии. Источниками загрязнений являются агломерационные машины, барабанные и чашевые охладители агломерата и возврата, обжиговые печи, а также многочисленные аспирационные системы, узлы пересыпки и сортировки и т.п.

Выбросы пыли зависят от количества мелких фракций в шихте, влажности шихты и степени ее подготовки, они могут колебаться в пределах 5-20 кг/т агломерата. Запыленность газов составляет 2-6 г/м³, в состав пыли входят до 26% FeO; до 65% Fe₂O₃; до 3% CaO [16]. После розжига шихты сквозь нее протягивают воздух, который насыщается соединениями углерода, серы и другими веществами, образовавшимися при взаимодействии кислорода воздуха с раскаленной шихтой. Состав агломерационного газа: CO 15-20%, CO₂ 20-25%, N₂ 40-45%, S – 2% [17]. Пройдя сквозь слой шихты, газ поступает через вакуум-камеры в коллектор, имеющийся под агломерационной машиной по всей ее длине. Часть пыли осаждается в этом коллекторе. Так как степень очистки газа от пыли в нем недостаточна, газ подвергается дальнейшей очистке, а затем

выбрасывается в атмосферу через высокую трубу для рассеивания не уловленных примесей.

В агломерационном производстве подвергаются очистке:

Газы, образовавшиеся в агломерационных машинах, в процессах охлаждения агломерата и возврата, в обжиговых печах, а также вентиляционные выбросы дробилок, грохотов, транспортеров подвергаются очистке. Схемы очистки газов показаны на рисунке 3 (а - батарейный циклон; б – мокрый прутковый центробежный скруббер; в – батарейный циклон и центробежный скруббер; г - циклон и электрофильтр; д –батарейный циклон и электрофильтр; е - электрофильтр)



1-агломерационная машина; 2-коллектор; 3-батарейный циклон; 4-дымосос; 5-дымовая труба; 6-центробежный скруббер; 7-циклон; 8-электрофильтр

Рисунок 3 – Схемы очистки газов, отходящих от агломерационных машин

1.3.3 Доменное производство

Доменный, или калошниковый, газ является побочным продуктом доменных печей. Он имеет очень низкую теплотворную способность, так как он

состоит из 60 процентов азота и 18-20% углекислого газа, которые не являются горючими веществами. Остальное в основном окись углерода и 2-4% водорода. Он не может быть использован в котлах и на электростанциях. Его можно комбинировать с природным газом или коксовым газом перед сжиганием или обогащать газом или маслом для обеспечения поддержания горения.

Обычно доменный газ имеет следующий состав: 3,5-6,5% водорода; 0,1-0,4% кислорода; 0,1-0,5% метана; 55% азота; 25-32% оксида углерода; 10-11% диоксида углерода; значительное количество пыли [18]. Производство одной тонны чугуна сопровождается выделением 2 тыс. м³ доменного газа. После очистки от пыли доменный газ может быть использован для отопления воздухонагревателей в доменном цехе; мартеновских печей, коксовых батарей, нагревательных колодцев (для нагрева слитков перед прокаткой) и для других объектов. Поэтому основное количество доменного газа не поступает в атмосферу [19].

Пыль, образующаяся при выплавке чугуна и работе с повышенным давлением на колошнике печи, имеет следующий химический состав: SiO₂ – 14,6%; MgO – 4,35%; Al₂O₃ – 4,35%; CaO – 11,85%; S – 0,74%; MnO – 3,75% и оксиды железа [18]. Размер частиц пыли может изменяться в различных диапазонах: 1– 10 мкм, 10 – 20 мкм, 20 – 60 мкм, 60 – 100 мкм, 100 – 200 мкм. Общая масса пыли, содержащаяся в доменном газе, составляет 20 - 100 кг а тонну чугуна.

Общее количество газа, образующегося в доменном производстве, равно 3880 м³ на тонну сырого кокса, или 4000 м³ на тонну сухого кокса, или 2000 - 2500 м³ на 1 тонну чугуна [20].

1.3.4 Мартеновское производство

Среди всех сталеплавильных агрегатов наибольшее количество выбросов производят мартеновские печи: оксидов серы - 90%, оксидов азота - 85% и 75% пыли. Источниками газов в мартеновской печи являются топливо, нагрев и

разложение сыпучих материалов и углекислый газ и окись углерода, выделяющиеся при окислении углерода шихты. На одну тонну садки при отоплении мартеновских печей природным газом выделяется от 1000 до 4000 м³/ч газа, имеющего на выходе из печи температуру 700- 800 °С. Химический состав газа зависит от вида применяемого топлива, состава шихты и технологии плавки. В нем содержатся оксиды углерода, азота и серы, кислород, водород, азот, водяной пар. Количество оксидов серы зависит от вида применяемого топлива и, например, при отоплении коксодоменным газом может достигать 800 мг/м³. Средний объемный состав уходящих продуктов сгорания печей, работающих на обогащенном кислородом дутье, %: 10,5-15,1 CO₂; 16-16,5 H₂O; 62,3-66,1 N₂; 6,5-7,2 O₂; следы SO₂ [21].

Кроме газообразных примесей, отходящий газ содержит значительные количества пыли - до 15 г/м³. В начале плавки пыль состоит из частиц руды и известняка, размер частиц довольно крупный. Пыль образуется в результате растрескивания шихты при нагреве. При продувке ванны кислородом при плавлении начинает выделяться мелкодисперсная пыль, размером менее 1 мкм, состоящая главным образом из оксидов железа. Кроме того, в ней содержатся оксиды алюминия, марганца и других веществ, входящих в состав шихты; оксиды железа придают газу коричневую окраску.

Пыль из мартеновской печи оседает, проходя газовый тракт: в шлаковике оседает около 50-60% пыли, в регенераторах - 15-20%, в котле-утилизаторе - 10-15%. Таким образом, содержание пыли в газе перед газоочисткой составляет 10-15% от общего объема пыли, вышедшего из печи [21].

Кроме пыли в уходящих мартеновских газах содержатся вредные газообразные компоненты: 30-50 мг/м³ окислов серы и 200-400 мг/м³ окислов азота, которые не улавливаются из отходящих газов.

В мартеновских цехах имеются неорганизованные источники поступления пыли в окружающую среду. Например, в воздухе миксерного отделения содержание пыли может доходить до 13 г/м³; в месте разгрузки сыпучих материалов 260-460 мг/м³; в люнкеритной установке 100-160 мг/м³. Отводимый от

мартеновской печи газ, перед выбросом в атмосферу подвергается обязательной очистке. Перед очисткой газ охлаждают в котлах-утилизаторах до 220-250 °С.

1.3.5 Электросталеплавильное производство

При выходе газов из электросталеплавильной печи содержание газовой фазы зависит от технологических режимов плавки, а так же от состава шихты. Газы выделяются из печи во время ее загрузки, в процессе плавки и розлива стали в ковш. Примерный состав газов [22] приведен в таблице 3.

Таблица 3 – Состав газов электросталеплавильного производства

Компоненты	CO ₂	CO	H ₂	O ₂	N ₂
Содержание, объемные доли %	15-25	5-11	0,5-35	3,5-10	61-72

Температура газа на выходе из печи составляет 1800-2000 °С. Из-за наличия в газе оксида углерода II газ является взрывоопасным, поэтому перед очисткой СО дожигается.

Газы, образующиеся в электросталеплавильном производстве, в значительной степени засорены пылью: без продувки кислородом содержание пыли в газе составляет от 2 до 10 г/м³, при продувке - от 14 до 100 г/м³. В состав пыли может входить до 80% оксидов железа, остальное: кремний, алюминий, марганец, кальций [23].

Вследствие трудности улавливания газов из электропечей в процессе производства примерно 40% образующегося газа, включая пыль, поступает в атмосферу цеха.

1.3.6 Конвертерное производство

При продувке кислородом жидкого чугуна в конвертере происходит выгорание углерода и других примесей из чугуна. Образующийся продукт

сгорания (конвертерный газ) содержит в основном оксид углерода (86-90%), диоксид углерода (8-14%), а также 1,5-3,5% O_2 ; 0,5-2,5% N_2 некоторые другие вещества, например серу [24].

Во избежание выбросов вредных веществ в атмосферу в виде бурого дыма за конвертером сооружают сложный и дорогой газовый тракт, включающий в себя установки для охлаждения конвертерных газов с использованием их тепла, газоочистные установки, дымососные установки и дымовую трубу [24].

Конвертерный газ захватывает с собой частицы руды, извести и другие добавки, загружаемые в конвертер. На 1 тонну плавки образуется до 90 м³ газа и до 20 кг пыли. Пыль состоит в основном из железа и его оксидов (60-70%), извести (5-17%), кремния (0,7-3,0%) и некоторых других компонентов [25]. Запыленность конвертерного газа при выходе из конвертера может достигать 250 г/м³.

1.3.7 Ферросплавное производство

При производстве ферросплавов твердые частицы образуются в процессе нескольких видов деятельности, в том числе в процессе сырой обработки материалов, плавки, нарезания и обработки продуктов. Органические загрязнители являются результатом плавки. Печи являются крупнейшими потенциальными источниками пыли и органических выбросов. Кроме пыли и оксида углерода, содержание которого может составлять до 80% всего объема отходящего газа, в выбросах находятся цианиды, фториды, сернистые и другие весьма вредные вещества [26].

В открытых печах оксид углерода, содержащийся газовых продуктах сгорания, смешивается с кислородом и сгорает, образуя диоксид углерода, при этом разлагаются цианиды, другие токсичные продукты поступают в атмосферу. Сокращение технологических выбросов может быть достигнуто в первую очередь созданием сводов для открытых рудно-термических печей, т.е. переделывание их

в закрытые печи. В закрытых печах количество газовых загрязнителей в 80-100 раз меньше, чем в открытых.

1.3.8 Литейное производство

В литейном цехе в воздух поступает большое количество таких загрязнителей, как оксиды углерода, серы, азота и железа, цианистый и фтористый водород. Эти вещества образуются в производственных печах, при сушке форм или литейных ковшей.

В литейном производстве присутствуют источники организованных и неорганизованных газовых выбросов. Литье чугуна и стали производится в вагранках и дуговых электропечах.

Для предотвращения выбросов пыли на оборудовании организуют конструкции-укрытия, из-под которых откачивается воздух. Это аспирационные вентиляционные системы. Откачиваемый воздух подвергается очистке, так как содержит кремний-содержащую пыль, частицы глинозема, доломита, известняка, угля и других веществ, как в твердом, так и в газообразном состоянии.

Газ, образующийся в вагранках, имеет следующий состав: оксид углерода (5-28%), диоксиды углерода и серы, углеводороды, кремнезем и др. Температура отходящих газов достигает 800-900 °С. Колошниковая пыль вагранок содержит 22-25% окислов железа, 28-31% окислов кремния, 3-4% окиси кальция [27]. Для обеспечения достаточной очистки газов применяют сухие и мокрые газоочистные аппараты в комбинации с рукавными фильтрами, скрубберами Вентури, электрофильтрами.

1.3.9 Прокатное производство

По сравнению вышеперечисленными производственными цехами черной металлургии в прокатном производстве образуется гораздо меньшее количество

пыли и газов. Общий выброс пыли от всех источников в цехах проката без огневой зачистки составляет в среднем 200 г/т, в цехах с огневой зачисткой - 500-2000 г/т. Основными источниками загрязнителей являются , машины огневой зачистки, печи, травильное оборудование, прокатные станы..

Удаление пыли на прокатном производстве осуществляют несколькими способами. В мелких прокатных станах устанавливают зонты. Однако, наилучший результат дает удаление пыли струей воды.

1.4 Основные компоненты первичных газовых выбросов металлургических предприятий

Оценив вклад основных этапов производства чугуна и стали в загрязнение атмосферы, можно выделить несколько основных компонентов выбросов, причем их образование происходит на различных этапах производства чугуна и стали.

Основным источником выбросов диоксида серы являются аглофабрики (45-55% от общего объема выбросов SO_2). Значительное количество H_2S или SO_2 выбрасывается в атмосферу в процессе обработки и охлаждения шлака (10-35%). Остальная часть SO_2 выбрасывается в окружающую среду из труб котельных, литейных цехов и прокатных станов.

Оксиды азота образуются в доменных печах, мартеновских печах, печах производства кокса и паровых котлах. В доменных цехах содержание NO_x в отходящих газах воздухонагревателей варьируется в пределах $(1,7 \div 6,6) \cdot 10^{-4}\%$. В вертикальных каналах мартеновских печей концентрация оксидов азота может отличаться: при нагреве без усилителей она составляет около 0,03%; при непрерывной подаче кислорода содержание NO_x увеличивается до 0,1%, а в некоторых случаях до 0,25%. Общее количество выбросов оксидов азота составляет в среднем 2,5 кг на тонну стали.

Оксид углерода выделяется главным образом на аглофабриках, коксохимических и доменных производствах. Содержание CO в мартеновских

печах достигает 0,53 кг на тонну стали, а при прокатном производстве не превышает 0,1%.

Фактические выбросы различных предприятий могут варьироваться в широких пределах, это связано с различием в сырьевой базе и технологиях производства, наличием усовершенствованного или устаревшего оборудования, недостаточный контроль производства и др. В таблице 4 приведены выбросы основных загрязняющих веществ ОАО «НЛМК» за 2008 год.

На рисунке 4 приведена диаграмма, показывающая вклад цехов ОАО «ММК» в формирование выбросов парникового газа CO₂ по данным 2005 года [28].

Таблица 4 – Вклад цехов в формирование выбросов ОАО «НЛМК» за 2008 год

Вещество	Основные цеха ОАО «НЛМК»									ВСЕГО
	АЛП	КХП	КЦ	ЛЦ	ОПЦ	ТЭЦ	ЦПМШ	ППП	ПРОЧИЕ	
CO, тыс.т	127,32	7,60	52,80	37,71	—	—	—	—	6,65	232,08
SO ₂ , тыс.т	9,47	1,77	—	0,22	—	5,67	—	—	0,70	17,83
NO ₂ , тыс.т	2,34	0,78	—	—	0,85	0,86	—	0,27	0,97	6,07
NO, тыс.т	1,07	0,36	—	—	0,39	0,39	—	0,12	0,44	2,77
H ₂ S, т	7,91	8,95	—	10,01	—	—	2,92	—	0,15	29,94
Нафта- лин, т	—	27,76	0,14	—	—	—	—	—	2,45	30,35
бенз(а)п ирен, т	0,0309	0,05383	0,00017	0,00105	—	0,00376	—	0,00115	0,00687	0,09777

Общие выбросы парниковых газов CO₂, тонн

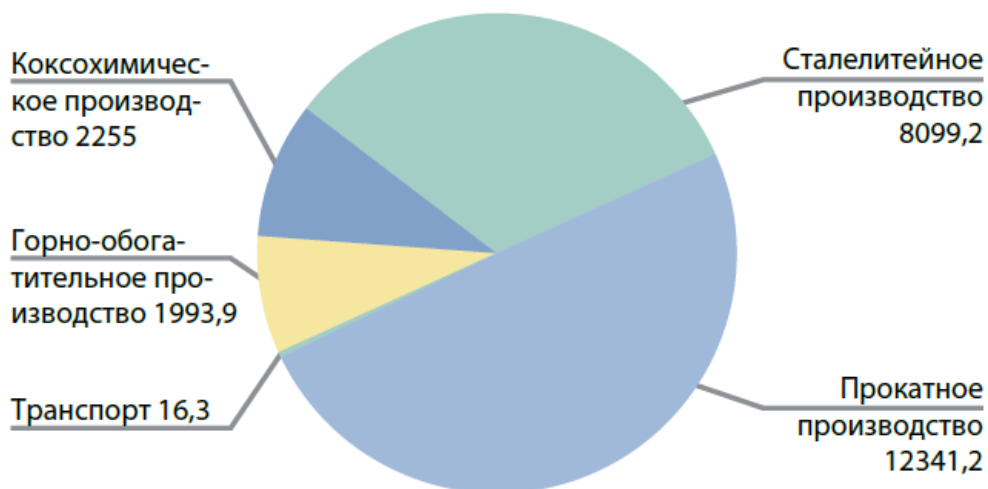


Рисунок 4 – Вклад цехов ОАО «ММК» в формирование выбросов парникового газа CO₂ по данным 2005 года

Рассмотрим более подробно основные компоненты выбросов металлургического производства.

1.4.1 Оксид углерода (II)

Оксид углерода (II) (или угарный газ, окись углерода, монооксид углерода) представляет собой бесцветный, без запаха и вкуса, менее плотный, чем воздух. Химическая формула — CO.

Окись углерода образуется когда нет достаточного количества кислорода для получения диоксида углерода (CO₂), например, при работе с печью или двигателем внутреннего сгорания, в замкнутом пространстве. В присутствии кислорода, в том в атмосфере, монооксид углерода горит голубым пламенем, производя углекислый газ. Некоторые процессы в современной технологии, такие как выплавка чугуна, до сих пор производят окись углерода в качестве побочного продукта.

Самым крупным источником окиси углерода является естественный источник, оксид углерода (II) образуется в результате фотохимических реакций в

тропосфере, которые генерируют около 5×10^{12} кг в год [29]. Другие природные источники СО - это вулканы, лесные пожары и другие формы горения.

Отравление угарным газом является наиболее распространенным типом смертельного отравления от вдыхания газов. Окись углерода бесцветный газ без запаха и вкуса и при этом токсичен. Наиболее распространенные симптомы отравления угарным газом могут походить на симптомы других видов отравлений, это такие симптомы, как головная боль, тошнота, рвота, головокружение, усталость и чувство слабости. Пострадавшие часто полагают, что они являются жертвами пищевого отравления. Младенцы могут быть раздражительными и плохо питаются. Неврологические симптомы включают спутанность сознания, дезориентацию, нарушение зрения, обмороки (потеря сознания) и судороги.

В России предельно допустимая концентрация в атмосферном воздухе составляет ПДК_{м.р} = 5 мг/м³ и ПДК_{с.с} = 3 мг/м³, в воздухе рабочей зоны ПДК_{р.з} = 20 мг/м³ для рабочего дня [29]. Для сравнения, в США рекомендуемая предельная концентрация в воздухе рабочей зоны - 40 мг/м³ [30].

1.4.2 Оксид углерода (IV)

Оксид углерода (IV) (диоксид углерода, углекислый газ, угольный ангидрид, двуокись углерода) - бесцветный газ, без запаха, тяжелее воздуха, химическая формула - CO_2 . При атмосферном давлении диоксид углерода не существует в жидком состоянии, переходя непосредственно из твёрдого состояния в газообразное. Твёрдый диоксид углерода называют сухим льдом. При повышенном давлении и обычных температурах углекислый газ переходит в жидкость, это используется для его хранения.

Концентрация углекислого газа в атмосфере Земли составляет в среднем 0,04 %. Атмосферный углекислый газ является основным источником углерода для жизни на Земле. Природные источники углекислого газа включают вулканы, горячие источники и гейзеры, он освобождается из карбонатных пород путем

растворения в воде и кислотах. Поскольку углекислый газ растворяется в воде, это происходит естественным образом в подземных реках и озерах, в ледниках, а также в морской воде. Он присутствует в месторождениях нефти и природного газа.

Углекислый газ легко пропускает ультрафиолетовое излучение и в то же время задерживает испускаемое Землей инфракрасное излучение, являясь, таким образом, парниковым газом. Постоянный рост концентрации этого газа в атмосфере наблюдается с начала индустриальной эпохи. Сжигание ископаемого топлива и вырубка лесов привели к увеличению атмосферной концентрации углекислого газа примерно на 43% по сравнению с началом эпохи индустриализации. Наибольшее количество диоксида углерода в результате деятельности человека освобождается от сжигания угля и других видов ископаемого топлива. Другие виды деятельности, в том числе вырубка лесов, сжигание биомассы и производство цемента также приводят к выделению углекислого газа. Вулканы выбрасывают от 0,2 до 0,3 миллиарда тонн углекислого газа в год, в то время как деятельность человека выделяют около 29 миллиардов тонн [31].

CO₂ является удушающим газом и не классифицируется как токсичное или вредное вещество. При повышении концентрации до 2-4% люди чувствуют себя сонными и слабыми. Концентрации 7% до 10% могут вызвать удушье даже в присутствии достаточного количества кислорода, появляется головокружение, головная боль, визуальная и слуховая дисфункция и потеря. При вдыхании больших концентраций газа наступает смерть от удушья.

Максимально разовая концентрация в воздухе рабочей зоны составляет 27000 мг/м³, а среднесменная 9000 мг/м³ [32]. Для сравнения, в США допустимая предельная концентрация при кратковременном воздействии составляет в воздухе рабочей зоны 54000 мг/м³, рекомендуемая предельная концентрация в воздухе рабочей зоны - 9000 мг/м³ [30].

1.4.3 Диоксид серы

Диоксид серы (сернистый газ, оксид серы (IV), двуокись серы, сернистый ангидрид) является токсичным газом с резким, раздражающим запахом, химическая формула SO_2 .

Диоксид серы является одним из основных загрязнителей воздуха и оказывает значительное воздействие на здоровье человека. Кроме того, концентрация диоксида серы в атмосфере может влиять на пригодность среды обитания для животных и растений. Выбросы диоксида серы являются предшественником кислотных дождей. Заметное увеличение количества диоксида серы в атмосфере наблюдается после вулканических извержений. Не меньшую опасность представляют промышленные предприятия, являясь непрерывным источником выбросов SO_2 . Для снижения воздействия на окружающую среду на промышленных объектах постоянно совершенствуются технологии, снижающие выбросы серы. К примеру, сера может быть удалена из топлива перед его сжиганием, это предотвратит образование SO_2 при сжигании. Топливные добавки, такие как кальций и карбоксилат магния используются в судовых двигателях для снижения выбросов двуокиси серы в атмосферу. К основным антропогенным источникам диоксида серы можно отнести металлургические и нефтеперерабатывающие производства, тепловые электростанции и др. В черной металлургии источниками основного количества выбросов серы являются агломерационные руды, коксовые батареи, доменные печи и сталеплавильные установки. В цветной диоксид серы выделяется при выплавке сульфидных руд.

Как уже было сказано, диоксид серы – токсичное вещество, вдыхание его приводит к увеличению респираторных заболеваний, заболеваний органов дыхания и преждевременной смерти. К общим симптомам можно отнести раздражение слизистой, кашель, затруднение глотания, удушье, рвота.

В России предельно допустимая концентрация в атмосферном воздухе составляет $\text{ПДК}_{\text{м.р}} = 0,5 \text{ мг/м}^3$ и $\text{ПДК}_{\text{с.с}} = 0,05 \text{ мг/м}^3$, в воздухе рабочей зоны $\text{ПДК}_{\text{р.з}} = 10 \text{ мг/м}^3$ [31]. Для сравнения, в США допустимая предельная

концентрация при кратковременном воздействии составляет 13 мг/м³, рекомендуемая предельная концентрация в воздухе рабочей зоны - 5 мг/м³ [30].

1.4.4 Сульфид водорода

Сульфид водорода (сероводород, сернистый водород, сульфид водорода, дигидросульфид) представляет собой бесцветный газ с характерным неприятным запахом тухлых яиц, он тяжелее воздуха, очень ядовит, легко воспламеним. Химическая формула - H_2S .

Сероводород часто является продуктом прокариотического распада органических веществ в отсутствие кислорода, например, в болотах и коллекторах; этот процесс обычно известен как анаэробное сбраживание. H_2S присутствует в вулканических газах, природном газе, в природных водах. Из природного газа сероводород может быть удален несколькими способами: прогонкой газа через контейнер гидратированного оксида железа III, который соединяется с сероводородом; гидрообессериванием; фильтрацией через пропитанный активированный уголь; плазменной диссоциацией.

Сероводород является очень токсичным и горючим газом. Будучи тяжелее воздуха, он имеет тенденцию к накоплению в нижней части плохо вентилируемых пространств. Очень едкий на первых порах, он быстро притупляет обоняние, поэтому потерпевшие могут не знать о его присутствии, пока не будет слишком поздно. Сероводород считается ядом широкого спектра действия, это означает, что он может воздействовать сразу на несколько различных систем в организме, наиболее подверженной является нервная система. Поскольку сероводород вырабатывается в организме естественным образом, существуют ферменты способные к детоксификации его путем окислением до сульфата. Таким образом, низкие уровни сероводорода достаточно безопасны. К симптомам отравления сероводородом относится головная боль, головокружение, тошнота, судороги, отёк лёгких. При высокой концентрации однократное вдыхание может вызвать мгновенную смерть.

В России предельно допустимая концентрация в атмосферном воздухе составляет $\text{ПДК}_{\text{м.р}} = 0,008 \text{ мг/м}^3$, в воздухе рабочей зоны $\text{ПДК}_{\text{р.з}} = 10 \text{ мг/м}^3$, в смеси с углеводородами $\text{ПДК}_{\text{р.з}}$ снижается до 3 мг/м^3 [31]. Для сравнения, в США допустимая предельная концентрация при воздействии не более 10 минут составляет 30 мг/м^3 , рекомендуемая предельная концентрация в воздухе рабочей зоны - 15 мг/м^3 [30].

1.4.5 Оксид азота (II)

Оксид азота (II) (или монооксид азота, окись азота) представляет собой бесцветный газ, химическая формула NO.

NO образуется при сжигании ископаемого топлива в энергетических установках и автомобильных двигателях, с избытком образуется а присутствии большого количества воздуха, и при высоких температурах, что это необходимо для эффективного и полного сгорания топлива. Он также производится естественным путем при чрезвычайно высокой температуре воздуха вдоль пути молнии во время грозы.

Оксид азота вступает в реакцию с гидропероксидным радикалом ($\text{HO}_2^\cdot$) с образованием диоксида азота (NO_2), который затем может реагировать с гидроксильным радикалом ($^\cdot\text{OH}$), образуя азотную у (HNO_3), одну из причин кислотных дождей. Кроме того, NO участвует в разрушении озонового слоя, вступая в реакцию со стратосферным озоном.

Оксид азота является токсичным газом, слизистые глаз и дыхательных путей, может вызвать отек легких. NO воздействует на кровь, приводя к образованию метгемоглобина, может вызвать смерть.

В России предельно допустимая концентрация в атмосферном воздухе составляет $\text{ПДК}_{\text{м.р}} = 0,4 \text{ мг/м}^3$ и $\text{ПДК}_{\text{с.с}} = 0,06 \text{ мг/м}^3$, в воздухе рабочей зоны $\text{ПДК}_{\text{р.з}} = 2 \text{ мг/м}^3$ [31]. Для сравнения, в США рекомендуемая предельная концентрация в воздухе рабочей зоны 30 мг/м^3 [30].

1.4.6 Оксид азота (IV)

Оксид азота (IV) (или диоксид азота) - красновато-коричневый газ, тяжелее воздуха, имеет характерный резкий, едкий запах. Химическая формула NO_2 .

NO_2 попадает в окружающую среду по естественным причинам, в том числе из стратосферы, в результате выработки бактериями, из вулканических выбросов. Наиболее известным антропогенным источником выбросов NO_2 являются двигатели внутреннего сгорания при сжигании ископаемого топлива. В закрытом помещении, NO_2 возникает от сигаретного дыма, керосиновых обогревателей и печей. Выбросы диоксида азота являются предшественником кислотных дождей.

NO_2 - токсичный газ, хроническое воздействие которого может вызвать респираторные заболевания, включая воспаление дыхательных путей. Симптомы отравления: головокружение, раздражение носа и горла, учащенное сердцебиение, бронхит, пневмония, судороги.

В России предельно допустимая концентрация в атмосферном воздухе составляет $\text{ПДК}_{\text{м.р}} = 0,2 \text{ мг/м}^3$ и $\text{ПДК}_{\text{с.с}} = 0,04 \text{ мг/м}^3$, в воздухе рабочей зоны $\text{ПДК}_{\text{р.з}} = 2 \text{ мг/м}^3$ [31]. В США рекомендуемая предельная концентрация в воздухе рабочей зоны $1,8 \text{ мг/м}^3$ [30].

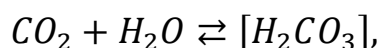
Среди всех компонентов выбросов металлургических предприятий следует выделить несколько веществ, представляющих особенный интерес. Это диоксид серы и оксиды азота, они являются прямыми предшественниками сильных кислот. Попадая в открытое воздушное пространство, эти оксиды начинают реагировать с компонентами атмосферы, образуя серную и азотную кислоты, которые являются причиной кислотных осадков. Интенсивность образования и распространения кислот в атмосфере зависит от многих факторов, таких как характеристика источника компонента-предшественника (расположение и мощность), характеристика подстилающей поверхности, метеорологические условия и др. Рассмотрим подробнее процесс образования кислот в атмосфере.

1.5 Образование кислот в атмосфере

1.5.1 Кислотообразующие компоненты атмосферы

1.5.1.1 Образование низших карбоновых кислот

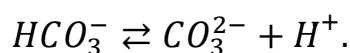
Дождевая вода даже в удаленных от источников антропогенных загрязнений районах может иметь величину рН, значительно отличающуюся от 7. Это связано с наличием в воздухе компонентов природного происхождения, влияющих на концентрацию в ней ионов водорода. Растворение CO_2 в каплях атмосферной воды определяется законом распределения [33]:



$$[\text{H}_2\text{CO}_3] = K_H P^{\text{CO}_2},$$

где P^{CO_2} - парциальное давление CO_2 ; K_H - константа Генри, зависящая от температуры.

Двухстадийная диссоциация приводит к появлению ионов водорода:



Константы первой (K_1) и второй (K_2) стадий диссоциации угольной кислоты определяются соотношениями:

$$K_1 = \frac{[\text{HCO}_3^-][\text{H}^+]}{[\text{H}_2\text{CO}_3]}, \quad K_2 = \frac{[\text{CO}_3^{2-}][\text{H}^+]}{[\text{HCO}_3^-]}.$$

При содержании CO_2 в атмосфере, равном 340 млн $^{-1}$, и при температуре 20°C расчетная концентрация ионов водорода составляет $2,3 \cdot 10^{-6}$ г-ион/л, что соответствует рН = 5,6 [34]. Поэтому "кислотными" принято называть атмосферные осадки с водородным показателем ниже этого значения.

Реально водородный показатель дождевой воды, отобранной в разных районах мира, лежит в пределах $2 < \text{pH} < 9$. "Раскисление" происходит обычно при захвате каплями дождя некоторых видов аэрозолей - частиц карбонатных

пород или морских аэрозолей (морская вода в силу своего ионного состава имеет щелочную реакцию, что отражается на составе образующихся из нее аэрозолей). На рисунке 5 показаны компоненты, определяющие значения pH осадков.

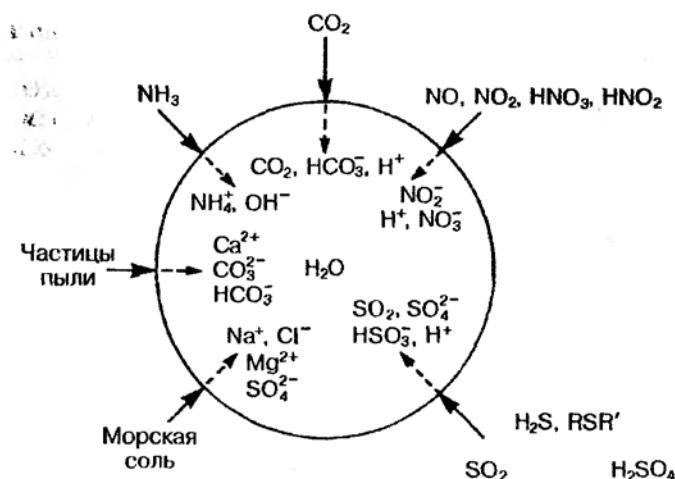


Рисунок 5 – Компоненты, оказывающие влияние на pH атмосферных осадков

В общем виде ионный баланс дождевой воды может быть представлен уравнением [35]:

$$[H^+]_{изб} + [H^+]_{H_2O} + [H^+]_{CO_2} + [NH_4^+] + [Na^+] + [K^+] + 2[Ca^{2+}] + 2[Mg^{2+}] = \\ = [HO^-] + [HCO_3^-] + 2[HCO_3^{2-}] + [Cl^-] + [NO_3^-] + 2[SO_4^{2-}] + [HS^-] + 2[S^{2-}] + \\ + [HCOO^-].$$

Решение этого уравнения относительно концентрации ионов водорода с учетом растворимости CO_2 , диссоциации H_2CO_3 и H_2O дает выражение:

$$[H^+] - \frac{K_{дис}^{H_2O} + K_1 K_{\Gamma} P^{CO_2}}{[H^+]} - \frac{2K_1 K_{\Gamma} P^{CO_2}}{[H^+]^2} = [Cl^-] + [NO_3^-] + 2[SO_4^{2-}] + [HS^-] + \\ + [HCOO^-] - [NH_4^+] - [Na^+] - [K^+] - 2[Ca^{2+}] - 2[Mg^{2+}].$$

Если известно содержание учитываемых последним уравнением ионов, появляется возможность расчета концентрации ионов водорода. Реконструированная таким образом величина pH проб дождевой воды, отобранных в Европе в довоенное время, составляет в среднем 5,5. И если сейчас в Западной и Центральной Европе обычны дожди с $pH < 5$, причем до 60-65 % их

кислотности определяется содержанием серной и до 30-35 % - азотной кислоты [36], то ясно, что связано это главным образом с увеличением концентраций предшественников этих кислот в атмосфере.

1.5.1.2 Источники серной кислоты

Наибольшие количества серы поступают в атмосферу в окисленном состоянии. Это прежде всего сульфаты морских аэрозолей. Общий поток серы на континенты в составе таких аэрозолей оценивается примерно в 17 Мт S/год [37]. Влияние этой составляющей глобального бюджета серы на кислотность атмосферных осадений неизвестно.

В морской воде практически отсутствуют кислые сульфаты, и поэтому до недавнего времени считалось, что аэрозолями морского происхождения при обсуждении проблемы кислотных осадений можно пренебречь. Между тем в определенных условиях частицы морской соли могут стать источником хлористого водорода, причем не только из-за эквивалентного вытеснения его более сильными кислотами, но и в результате некоторых фотокаталитических процессов.

Теоретически такого рода процессы возможны: при облучении кристаллов хлоридов щелочных металлов коротковолновым светом происходит образование свободного хлора (реакция его с водой в дальнейшем дает HCl). Наличие примесей и других дефектов кристаллической решетки, вероятно, может привести к такому же эффекту при облучении даже в ближней УФ-области солнечного спектра, т. е. светом, достигающим земной поверхности. Однако это наше предположение нуждается в проверке экспериментом.

В настоящее время атмосферная часть глобального цикла серы существенно нарушена человеческой деятельностью. На середину 1980-х гг. поток различных соединений серы из антропогенных источников оценивался величиной 93 Мт S/год, в том числе в форме SO₂, сульфатов аэрозолей и H₂S - 80, 10 и 3 Мт S/год

соответственно [38]. Как видно, почти 90 % антропогенной эмиссии приходилось на восстановленные соединения серы.

В таблице 5 приведены общие объемы выбросов SO_2 в странах Азии [39]. В период 1975-1987 гг. этот валовые выбросы SO_2 увеличились в полтора раза. При этом в некоторых странах выбросы все-таки снизились. Причиной этого является предварительная очистка твердых и жидких топлив от серы или переход на газовое топливо, которое содержит гораздо меньше серы.

Таблица 1 - Выбросы SO_2 странами Азии

Страна	Выбросы, 10^3 т/год				
	1975	1980	1985	1986	1987
Китай	10180	13370	17260	18330	19990
Япония	2450	2010	1060	977	985
Индия	1650	1440	2830	2920	3070
Индонезия	201	329	435	453	485
Ю. Корея	1160	1920	1370	1360	1290
25 стран Азии	18230	22840	26150	27270	28980

В США и в западноевропейских странах в 1980-х гг. выброс диоксида серы в атмосферу также сокращался. Однако в целом антропогенный поток SO_2 все еще остается большим и в глобальных масштабах (80 ± 10 Мт S/год) превосходит мощность природных источников или имеет сопоставимую с нею величину.

1.5.1.3 Источники азотной кислоты

Предшественниками азотной кислоты являются аммиак и оксиды азота (II) и (IV).

Основным источником аммиака является разложение биогенных азотсодержащих соединений - белков и мочевины. Выделение аммиака в атмосферу из всех наземных источников в атмосферу составляет 70-100 Мт N/год [40]. При этом антропогенные источники аммиака выбрасывают примерно 4 Мт N/год.

Валовый выброс NO_x из всех антропогенных источников на начало 1980-х гг. оценивался в 53 Мт N/год (при разбросе от 40 до 90). Структура выбросов оксидов азота при этом была таковой: транспорт - 50 %, тепло- и электроэнергетика – 37%, промышленные источники – 13%. В таблице 6 представлены данные о выбросах NO_x от всех источников в 25 азиатских странах [41].

Таблица 6 – Выбросы NO_x странами Азии

Страна	Выбросы, 10^3 т/год				
	1975	1980	1985	1986	1987
Китай	7330	4910	6360	6770	7370
Япония	2330	2130	1950	1900	1940
Индия	1380	1670	2310	2400	2560
Индонезия	331	465	561	600	639
Ю. Корея	220	365	464	499	555
25 стран Азии	9390	11350	13810	14460	15480

Вследствие того, что при сжигании топлива происходит окисление азота, которое практически не поддается контролю, уменьшение выбросов NO_x , дается с большим трудом. Поэтому динамика снижения выбросов NO_x по сравнению с SO_2 , практически не наблюдается.

Уменьшить выброс NO_x можно с помощью перевода энергетических установок и транспорта на другие (новые) виды топлива.

Для отходящих дымов угольных теплоэлектростанций характерны следующие уровни кислотообразующих газов (млн^{-1}): 1500 для SO_2 , 500 для NO_x и 150 для HCl [42].

Соотношение NO_2/NO в выделяемых газах зависит от условий горения. Например, при температуре горения 600 °C на выходе камеры сгорания газовой турбины соотношение равно примерно 5, при 700 °C уменьшается до 1, а при 750 °C - до 0,5. В дымовых газах ТЭС в зависимости от вида топлива и режимов горения это отношение обычно находится в пределах 0,05-0,2 [43].

Приведенные данные относятся к 70-80 годам прошлого века, однако они отражают тенденции, характерные и для последнего десятилетия XX века. В

1990-х гг. также наблюдалась тенденция снижения удельных выбросов SO_2 и NO_x развитыми странами, но выбросы этих загрязнителей развивающимися странами увеличивались. Причиной этого является, во-первых, то, что в развитых странах повсеместно совершенствовались технологии сжигания топлива и появлялись более чистые его виды. Во-вторых, «грязные» производства перемещались из развитых стран в страны третьего мира вследствие дешевизны.

Крупным источником NO_x служат лесные пожары. Однако, только около 3 % пожаров происходит в результате естественных причин (молний), поэтому этот источник с полным основанием можно отнести к антропогенным. В результате пожаров ежегодно страдает около 7-8 млн. га, в процесс горения вовлекается до 5 Гт углерода в составе биомассы. Предельная величина оценки эмиссии NO_x в результате пожаров составляет 8,5 Мт N/год [44].

1.5.1.4 Концентрации кислотообразующих компонентов в атмосфере

Концентрации таких предшественников кислот, как SO_2 , NO_x , а также аммиака, диметилсульфида, CS_2 и COS претерпевают значительные колебания во времени и пространстве, что связано с особенностями распределения источников на земной поверхности и динамики их функционирования. Типичные уровни концентраций некоторых из интересующих нас соединений серы и азота приведены в таблице 7 [45].

Таблица 7 – Концентрации соединений азота и серы в приземном слое атмосферы (интервалы возможных концентраций приведены в скобках)

Компонент	Содержание в воздухе, мкг/м ³		
	городов	пригородов	фоновых районов
SO_2	40 (5-20)	10 (1-50)	0,5 (0,1-3)
H_2S	3 (0,5-10)	0,5 (0,2-3)	0,3 (0,1-1,0)
SO_4^{2-} (аэрозоли)	12 (3-25)	10 (1-20)	2,0 (0,5-5)
NO	8 (1-30)	1,5 (0,3-5)	0,2 (0,1-0,5)
NO_2	20 (3-100)	4 (1,0-15)	0,5 (0,2-1,5)
HNO_3 (газ)	3 (0,5-15)	1,5 (0,1-6)	0,2 (0,03-2)
NO_3^- (аэрозоли)	3 (0,5-15)	2,0 (0,3-8)	0,4 (0,05-4)

Наиболее высокие концентрации вредных веществ наблюдаются в воздухе мегаполисов; зачастую они на один-два порядка выше, чем в сельских районах. Заметное повышение концентраций загрязняющих веществ, особенно в городах, наблюдается в холодные периоды, это связано с работой отопительных систем.

Вследствие активного вклада антропогенных источников в атмосферный резервуар серы и неравномерности их распределения на земной поверхности наблюдается сильное различие в концентрациях SO_2 между полушариями. На рисунке 6 показан меридиональный профиль концентраций SO_2 и сульфатов в составе аэрозолей в нижних слоях тропосферы над Атлантическим океаном [46]. Максимальное содержание SO_2 приходится на зону $55\text{--}30^\circ$ с. ш. Кривая распределения концентрации сульфатов имеет два максимума: в районе $35\text{--}40^\circ$ с. ш. и в тропических широтах Южного полушария. Последний объясняется, очевидно, более активной фотохимической трансформацией предшественников в сульфатную серу. Соответственно, в этом же районе максимального значения достигает отношение $\text{SO}_4^{2-} / \text{SO}_2$. Вероятно, это можно объяснить увеличением скорости фотохимического окисления, инициируемого озоном и радикалами, концентрации которых с высотой возрастают.

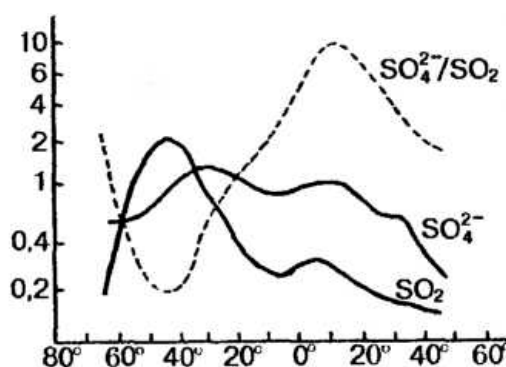


Рисунок 6 – Широтный профиль концентраций SO_2 и сульфатов в составе аэрозолей над Атлантическим океаном

Поскольку биогенная сера в составе диметилсульфида (ДМС) рассматривается в настоящее время в качестве одного из главных предшественников серной кислоты и кислых сульфатов атмосферы, содержание этого

соединения определялось многими исследователями в разных районах мира. Некоторые результаты этих измерений приведены в таблице 8 [47].

Таблица 8 – Концентрации диметилсульфида (в пересчете на серу) в морском и континентальном воздухе

Место отбора проб	Концентрация, трлн ⁻¹	
	пределы	средняя
Тихий океан, экваториальная часть	47,6-290	112,7
Атлантический океан:		
Северная и центральная часть	0,7-30,8	2,8
Район Багамских островов	3,5-469,2	85,4
Карибское море и мексиканский залив	0-800	57
О.Тасмания, ст. Кейп-Грим	23,8-336,8	116,9
ФРГ:		
Франкфурт-на-Майне	3,5-329,1	22,4
Гора Кляйнер Фельдберг	3,5-14,7	6,3

Высокие концентрации ДМС в воздухе городов связаны с эмиссией серы при микробиологическом разложении остатков пищи в мусоронакопителях, особенно на свалках бытовых отходов. Кроме ДМС здесь выделяют и другие дурнопахнущие соединения серы: метил-, этил- и пропилмеркаптаны, диметилдисульфид, сероуглерод. Содержание меркаптанов в газах, поступающих в атмосферу с поверхности городских свалок, достигает 21 млн⁻¹. Общая эмиссия серосодержащих соединений на некоторых свалках США, подвергнутых обследованию, находилась в пределах 0,01-0,26 г S/(м²·год) [48].

Высокой степенью неоднородности характеризуется также распределение в тропосфере соединений азота. Содержание аммиака в приземном слое атмосферы обычно находится в пределах 0,3-9 мкг/м³ [49]. При подъеме на высоту 2 км оно уменьшается более чем в три раза и держится на этом уровне в верхних слоях тропосферы. Максимальные концентрации аммиака наблюдаются в летнее время.

Значительный вклад (до 50-65 %) в кислотность атмосферных осадков в районах, не подверженных прямому влиянию антропогенных источников, вносят низшие карбоновые кислоты: уксусная, муравьиная и пировиноградная.

Эти кислоты появляются в атмосфере в результате окисления органических соединений. Формальдегид CH_2O является непосредственным предшественником муравьиной кислоты, а более отдаленным предшественником является метан. Поэтому муравьиная кислота присутствует в тропосфере и стратосфере. Ее концентрации на высоте 8-10 км над США отмечались на уровне $0,4-0,6 \text{ млрд}^{-1}$ ($0,8-1,2 \text{ мкг/м}^3$) [50]. В приземных слоях фоновая концентрация составляет $0,1-3 \text{ млрд}^{-1}$.

Кроме того, в нижних слоях атмосферы присутствует уксусная кислота ($0,2-1 \text{ млрд}^{-1}$, или $0,5-2,7 \text{ мкг/м}^3$ в сельских районах). В воздухе городов во время смога концентрации этих кислот увеличиваются с $3-10 \text{ млрд}^{-1}$ до $20-40 \text{ млрд}^{-1}$ [51].

1.5.2 Механизмы образования кислот из первичных газовых выбросов

Можно выделить три основных процесса окисления компонентов-предшественников кислот: газофазное гомогенное, гетерогенное на поверхности твердых частиц и окисление в жидко-капельной фазе.

В зависимости от самого вещества предшественника, то есть от его свойств и от условий окружающей среды, может преобладать тот или иной процесс окисления. Рассмотрим процессы окисления основных кислотообразующих компонентов.

1.5.2.1 Соединения серы

Гомогенное газофазное окисление SO_2 . В таблице 9 приведены кинетические характеристики первых стадий реакций SO_2 с основными окислительными агентами земной атмосферы — кислородом, озоном и различными радикалами, а также рассчитанные средние времена жизни (τ) молекул диоксида серы по отношению к этим процессам. Сопоставление роли каждого из окислителей удобнее производить после несложной операции понижения порядка реакции до псевдопервого [52].

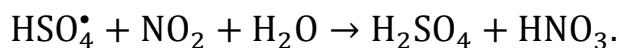
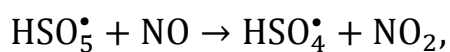
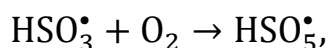
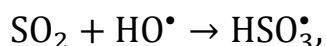
Таблица 9 – Первые стадии реакций газофазного окисления и время жизни молекул SO_2 в атмосфере

Реакция	k , $\text{см}^3/(\text{молекула} \cdot \text{с})$	Типичная среднесуточная концентрация окислителя, см^3	τ , ч
$\text{SO}_2 + \text{O}_2 \rightarrow \text{SO}_3 + \text{O}^\bullet$	10^{-30}	$5 \cdot 10^{18}$	$5 \cdot 10^7$
$\text{SO}_2 + \text{O}_3 \rightarrow \text{SO}_3 + \text{O}_2$	10^{-22}	$8 \cdot 10^{11}$	$3 \cdot 10^6$
$\text{SO}_2 + \text{HO}_2^\bullet \rightarrow \text{SO}_3 + \text{HO}^\bullet$	$7,8 \cdot 10^{-16}$	$3 \cdot 10^8$	1200
$\text{SO}_2 + \text{CH}_3\text{OO}^\bullet \rightarrow \text{SO}_3 + \text{CH}_3\text{O}^\bullet$	$1,8 \cdot 10^{-14}$	$7 \cdot 10^7$	227
$\text{SO}_2 + \text{HO}^\bullet + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2\text{SO}_4 + \text{HO}_2^\bullet$	$1,8 \cdot 10^{-12}$	$1,8 \cdot 10^6$	86

Видно, что основной по массе окислитель атмосферы — молекулярный кислород — сам по себе не оказывает существенного влияния на судьбу SO_2 . То же самое относится и к реакции с озоном. Отсюда можно сделать вывод: газофазное окисление SO_2 происходит практически полностью в дневное время, так как наиболее быстро реагирующие с диоксидом серы радикальные частицы $\text{CH}_3\text{OO}^\bullet$, $\text{HO}_2^\bullet$ и $\text{HO}^\bullet$ генерируются в газовой фазе атмосферы на свету [53].

Реакция с атомарным кислородом играет важную роль только в стратосфере, куда SO_2 забрасывается в ходе эруптивных извержений вулканов. В стратосфере концентрации $\text{O}(^3\text{P})$ на два порядка выше, чем в тропосфере.

О ведущей роли радикалов в гомогенном газофазном окислении SO_2 говорят и результаты опытов в смоговых камерах. Они показали, что скорость процесса резко увеличивается, если в камеру вводятся оксиды азота. Окисление протекает с образованием ряда промежуточных частиц:



Окисление углеводородов в атмосфере приводит к образованию радикалов $\text{CH}_3\text{OO}^\bullet$, $\text{HOO}^\bullet$ и $\text{HO}^\bullet$. Поэтому в сильно загрязненной атмосфере окисление диоксида серы ускоряется.

Суммирование всех процессов гомогенного газофазного окисления SO_2 дает для летнего периода на 45° с. ш. обобщенный коэффициент скорости $0,015 \text{ ч}^{-1}$, среднее время жизни — около 70 ч [54].

Гетерогенное окисление SO_2 на поверхности твердых аэрозолей. Молекулы SO_2 активно адсорбируются на развитой поверхности атмосферных аэрозолей. Особо отмечают высокую сорбционную емкость по отношению к диоксиду серы летучей золы и сажи. Считается, что аэрозоли адсорбируют также молекулы и радикалы окисляющих агентов. Что касается последних, то более вероятна не сорбция, которая должна сопровождаться гибелью радикалов, а фотостимулированное генерирование на самой поверхности частиц. Все они содержат полупроводниковые материалы с примесями в кристаллической решетке, обеспечивающими появление фотоэлектронов при поглощении света с энергией, меньшей необходимой для перехода электронов из валентной зоны в зону проводимости. Адсорбция на возникающих активных центрах молекул кислорода, пероксида водорода, а также фотокаталитическое разложение адсорбированной воды должны приводить к появлению радикалов $\text{O}^\bullet$, $\text{HO}^\bullet$ и $\text{HO}_2^\bullet$, инициирующих окисление восстановленных компонентов [55].

Образование радикалов и первые стадии окисления SO_2 на поверхности полупроводниковых материалов природного происхождения может быть представлено в виде схемы, изображенной на рисунке 7.

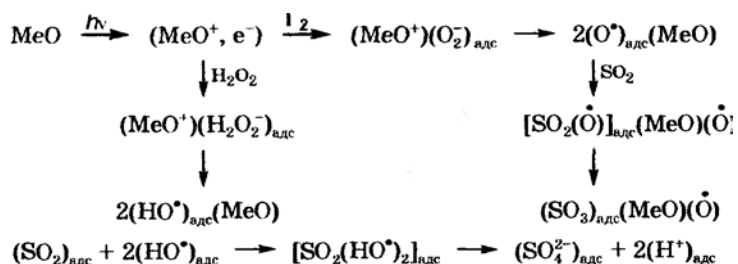
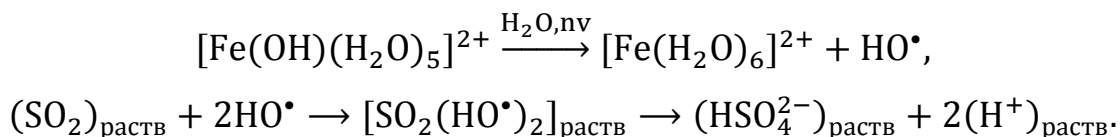


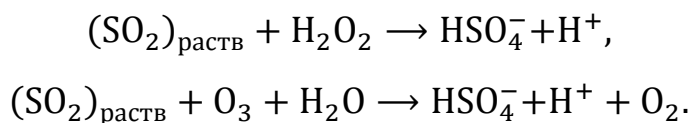
Рисунок 7 – Образование радикалов и первые стадии окисления SO_2

Исследования показывают, что на частицах летучей золы при 25 °С и относительной влажности 90 % происходит быстрое окисление диоксида серы [56]. Очевидно, такой процесс играет особенно важную роль в химических превращениях в дымовых факелах ТЭС, содержащих большие количества твердых частиц. Обобщенный коэффициент скорости гетерогенных реакций в дымовых газах ТЭЦ может составлять 0,3 ч⁻¹ [57], однако по мере удаления от источника и разбавления присутствующих в дымовом шлейфе загрязняющих компонентов чистым воздухом его величина должна уменьшаться. Для атмосферы промышленных районов эту константу принимают равной 0,01 ч⁻¹, что соответствует времени жизни молекул SO₂ относительно гетерогенных реакций 100 ч [49].

Окисление в жидко-капельной фазе облаков и туманов также, вероятно, носит характер каталитического процесса. В качестве катализаторов могут выступать аквакомплексы ионов переходных металлов. Их разложение под действием света приводит к появлению радикалов:



Кроме того, могут протекать реакции с растворенными в водной фазе пероксидами и озоном:



Лабораторные эксперименты показали, что окисление SO₂ озоном и H₂O₂ в жидко-капельной фазе протекает быстро: обобщенные константы скоростей таких процессов находятся на уровне 1 ч⁻¹ [58]. В реальных условиях атмосферы скорости таких процессов зависят от многих параметров: погодных условий, соотношения "влажных" и "сухих" дней в тот или иной сезон, величины рН капель атмосферной влаги. Последний показатель играет особо важную роль, поскольку от кислотности внутренней среды капель зависит как сопротивление растворению SO₂, так и соотношение в растворе ионных и молекулярных форм. При низких

значениях pH (менее 3,5) растворяющийся диоксид серы должен практически полностью находиться в молекулярной форме. По мере увеличения pH возрастает доля ионов HSO_3 , легко окисляемых растворенным в каплях озоном. В этом отношении наиболее благоприятные условия окисления создаются в жидкой фазе обводненных частиц летучей золы, содержащей вещества типа CaO .

Натурные наблюдения за окислением SO_2 в городском воздухе и образуемых крупными городами шлейфах загрязняющих компонентов, протяженность которых составляет сотни километров, позволили получить ряд эмпирических зависимостей для его описания. Например, обобщенная константа скорости окисления в загрязненных воздушных массах $K_{\text{сум}}$ может быть представлена в виде:

$$K_{\text{сум}} = pRh[\text{O}_3], \quad (2)$$

где R - интегральный поток солнечной радиации на уровне земли, Вт/м^2 ; h - высота слоя перемешивания, м; $[\text{O}_3]$ - концентрация озона в воздухе, млрд^{-1} . Включение в это соотношение последней величины не означает, что в расчет принимается именно только реакция $\text{SO}_2 + \text{O}_3$: численный коэффициент уравнения ($p = 0,03+0,01$) учитывает также вклад озона в генерирование радикалов, являющихся главными окислительными агентами [59].

В сельской местности центральной части европейского континента $K_{\text{сум}}$ для процессов в жидко-капельной фазе оценивается в $0,007 \text{ ч}^{-1}$ (время жизни - около 140 ч) [60].

Зависимость $K_{\text{сум}}$ от времени переноса воздушных масс определяется другим эмпирическим соотношением $K_{\text{сум}} = 1/(2.1t)$, где t - время переноса, ч. Это соотношение справедливо для t в пределах от 3 до 25 ч [61].

Общая скорость окисления определяется вкладом всех трех перечисленных механизмов - газофазного, гетерогенного и жидко-капельного. Оценки лежат в пределах от $0,005$ до $0,15 \text{ ч}^{-1}$ [62]. В качестве наиболее реалистичного предлагается значение константы $0,027 \text{ ч}^{-1}$, что соответствует среднему времени жизни молекул SO_2 , равному 37 ч [63]. На рисунке 8 приведены результаты

определения скорости окисления SO_2 в факеле одной и той же тепловой электростанции (г. Сент-Луис, США) в разное время дня и в разные сезоны [64]. Они показывают, что внутрисуточные и внутригодовые колебания составляют более порядка величины.

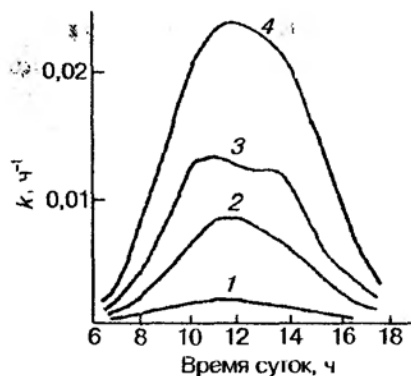


Рисунок 8 – Вариации скорости окисления SO_2 в дымовом факеле ТЭС:

1 - январь; 2 - октябрь; 3 - апрель; 4 - июль

Образовавшийся при окислении SO_2 триоксид с большой скоростью превращается в серную кислоту: $\text{SO}_3 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2\text{SO}_4$, $k = 10^5 \text{ с}^{-1}$. В свою очередь, серная кислота нейтрализуется с образованием средних или кислых сульфатов, главным образом - солей аммония. Для европейского континента константа скорости нейтрализации H_2SO_4 в атмосфере оценивается величиной $0,02 \text{ ч}^{-1}$, что соответствует времени жизни около 50 ч. Соотношение между концентрациями предшественника (SO_2), "промежуточного" (H_2SO_4) и конечных (сульфаты) продуктов в ходе атмосферного переноса показаны на рисунке 9 [64].

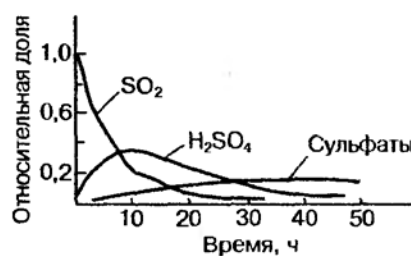


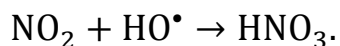
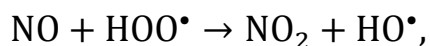
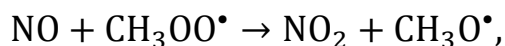
Рисунок 9 – Зависимости содержания SO_2 , H_2SO_4 и сульфатов в атмосфере от времени переноса от источника выбросов

Видно, что максимальное количество серы в составе H_2SO_4 достигается при пятикратном уменьшении количества SO_2 . Примерно через 30 ч переноса (при скорости ветра 30 км/ч это соответствует расстоянию 900 км) уже начинают превалировать сульфаты.

Иницируемое радикалами окисление диметилсульфида также приводит к образованию кислот (метилсульфоновой и серной), и этот процесс также вносит вклад в формирование кислотности атмосферных осадков. Однако оценки масштабов генерации сильных кислот за счет окисления ДМС в настоящее время отсутствуют.

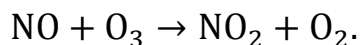
1.5.2.2 Оксиды азота

Предполагается, что в образовании азотной кислоты из монооксида и диоксида азота ведущую роль играют гомогенные газофазные реакции с участием радикалов:



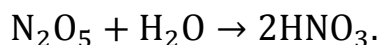
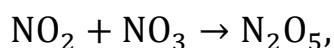
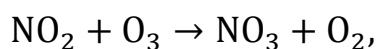
Константы скоростей этих реакций равны соответственно $1,7 \cdot 10^{-11}$, $2,4 \cdot 10^{-11}$ и $1,1 \cdot 10^{-11}$ см³/(молекула·с) [65], эти реакции протекают значительно быстрее, чем реакции SO_2 с теми же радикалами.

NO также реагирует с озоном с высокой скоростью окисления ($1,8 \cdot 10^{-14}$ см³/(молекула·с)) [37]:



Поэтому время жизни NO_x в атмосфере значительно меньше, чем время жизни SO_2 : при средней суточной скорости газофазного окисления в условиях лета на 45° с. ш. с константой, равной $0,1 \text{ ч}^{-1}$, оно составляет примерно 10 ч [35].

Ночью прекращается фотохимическая генерация радикалов, и окисление NO_x с образованием азотной кислоты продолжается за счет взаимодействия оксидов с озоном и NO_3 .



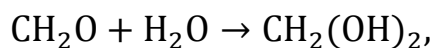
Вклад в окисление NO_x вносят также реакции в водной фазе и гетерогенные процессы. Для NO_2 в качестве основного направления окисления в жидко-капельных аэрозолях рассматривается взаимодействие с пероксидом водорода.

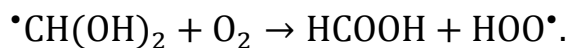
Обобщенный коэффициент скорости всех возможных химических процессов окисления NO_x оценивается величиной $0,14 \text{ ч}^{-1}$ (время жизни около 7 ч) [33]. Для нейтрализации HNO_3 с образованием нитратов (главным образом, нитрата аммония) скорость принимается такой же, как и для серной кислоты ($0,02 \text{ ч}^{-1}$) [52].

1.5.2.3 Образование низших карбоновых кислот

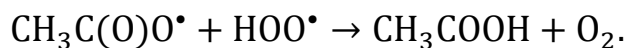
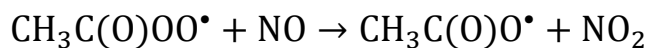
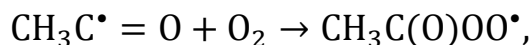
Компонентами-предшественниками уксусной и муравьиной кислот в атмосфере являются органические соединения самых различных классов. Механизмы образования кислот из этих предшественников существенно отличаются друг от друга. В одних случаях реакция идет через образование на промежуточной стадии альдегидов (например, формальдегида из метана), а в других кислоты выступают как продукты стабилизации радикалов и бирадикалов.

Вследствие высокой растворимости альдегидов $\text{C}_2\text{—C}_3$ одним из основных направлений их окисления могут быть процессы в водной фазе. Например, превращение формальдегида в муравьиную кислоту в каплях дождя, облаков и туманов может описываться уравнениями [44]:





В качестве альтернативного направления может выступать газофазное окисление альдегидов [47]:



Образование карбоновых кислот возможно также при окислении органических соединений на поверхности твердых аэрозолей. Последующий захват частиц каплями воды или сухое осаждение на подстилающую поверхность оказывают определенное влияние на баланс ионов водорода.

1.6 Мониторинг

Вся система мониторинга качества воздуха может быть представлена в виде пирамиды, на вершине которой проводится глобальный фоновый мониторинг, то есть измерения концентрации в самых нетронутых местах на планете, удаленных от областей активной человеческой деятельности. На следующей ступени пирамиды находится система регионального мониторинга. Далее располагается импактный мониторинг (от английского «impact» - прямое воздействие), производится непосредственно в районах активной человеческой деятельности.

Следующей ступеней пирамиды должен быть мониторинг источников выбросов, то есть мониторинг на самих предприятиях. Такой мониторинг должен проводиться службами предприятия или субподрядчиками. В развитых странах со стабильной экономической ситуацией мониторинг источников проводится повсеместно или, в некоторых случаях, совмещен с импактным мониторингом. В РФ такой мониторинг осуществляется только самыми крупными

промышленными предприятиями. Основной проблемой в этом считается экономическая ситуация [66].

Рассмотрим подробнее виды мониторинга.

1.6.1 Мониторинг источников

Состав и количество выбросов вредных веществ в источнике определяется технологиями производства и их совершенствованием. Концентрация загрязнителей в источнике превышает ПДКс.с. во много раз. С приемом пробы из источника связаны некоторые сложности, причиной которых являются гетерогенные потоки выбросов, высокая температура отходящих газов неравномерный по времени и диаметру дымохода выброс. Однако, существуют перспективные бесконтактные методы анализа, которые не требуют отбора проб.

Организация мониторинга источников загрязнения осуществляется с целью получения своевременной и систематической информации о качестве воздуха, особенно для технологической и экологической безопасности самих управляемых объектов с приоритетными вопросами безопасности и комфорта условий труда персонала.

1.6.2 Импактный мониторинг

Уровень и состав и концентрации загрязняющих веществ в основном определяются производствами, находящимися в месте проведения мониторинга. В этом случае физические и химические процессы в окружающей среде и погодные условия играют существенную роль в наблюдаемом уровне концентрации загрязняющих веществ. Существует тесная взаимосвязь между местоположением источников выбросов, их параметрами, характеристикой ветра и концентрацией загрязняющих веществ. Наблюдения могут происходить на стационарных, мобильных и подфакельных постах.

Стационарные посты оборудованы инструментами для контроля за 3-4 основными загрязняющими веществами и метеорологической аппаратурой.

Мобильные посты - мобильные лаборатории, которые служат для уточнения расположения стационарных станций. Это уточнение требуется в связи с динамичностью хозяйственной деятельности человека и изменениями в характеристике застройки.

Подфакельные посты следят за процессом распространения выбросов из производственных труб, для контроля критических случаев, особенно при неблагоприятных погодных условиях. Службы подфакельного мониторинга также снабжены мобильными лабораториями.

1.6.3 Региональный мониторинг

На значительном удалении от производственных предприятий уровень загрязнителей снижается практически до фоновых концентраций.

Региональный мониторинг является соединительным звеном между импактным и глобальным мониторингом, он позволяет выявить основные траектории и способы распространения вредных веществ на большие расстояния. На региональном уровне замеры концентраций загрязнителей атмосферы могут происходить в населенных пунктах, расположенных на достаточном удалении от всех источников загрязнения. Существуют посты наблюдения за трансграничным переносом вредных веществ, сведения от этих постов могут так же передаваться службам регионального мониторинга.

Одним из косвенных показателей состояния загрязнения воздуха являются данные проб атмосферных осадков и снежного покрова и их химический анализ.

1.6.4 Фоновый мониторинг

Увеличение выбросов вредных выбросов в атмосферу с начала эпохи индустриализации и, вследствие этого, повышенное содержание примесей на

значительном расстоянии от крупных городов приводит к глобальному изменению в составе атмосферы, это, в свою очередь, угрожает нежелательными последствиями, включая изменение климата. В связи с этим необходимо постоянно контролировать уровень загрязнения воздуха далеко за пределами зоны действия промышленных источников.

Всемирная метеорологическая организация (ВМО) в шестидесятих годах XX века создала глобальную сеть станций мониторинга загрязнения воздуха на фоновом уровне. Ее цель состояла в том, чтобы получить информацию о фоновых уровнях концентрации веществ, находящихся в атмосфере, а так же их соединений и изменений, по этим данным можно судить о влиянии человеческой деятельности на атмосферу.

Заключение по главе 1

Предприятия черной и цветной металлургии являются одними из самых интенсивных источников выбросов в атмосферу загрязняющих веществ, концентрация которых может значительно превышать нормы. Уровень выбросов в значительной степени зависит технологий производства, современности оборудования и сырьевого фактора. Основную часть выбросов вредных веществ, поступающих в атмосферу от металлургических предприятий, составляют вещества повышенной токсичности, они негативным образом влияют на здоровье людей и окружающую природу. Однако не меньшую опасность представляют вещества, являющиеся продуктами реакций газовых выбросов с компонентами атмосферы, то есть вторичные загрязнители, или вторичные выбросы. Первичные выбросы серосодержащих и азотсодержащих веществ являются прямыми предшественниками вторичных токсичных веществ, сильных летучих кислот. Распространение этих кислот, то есть вторичных выбросов, зачастую опаснее, чем первичных.

Контроль состояния атмосферного воздуха в районах расположения металлургических предприятий проводится с помощью регионального

мониторинга и мониторинга источников, однако это не решает экологическую проблему металлургического региона. Прогнозирование и контроль уровня загрязнения воздуха необходимо решать с использованием моделирования процессов загрязнения воздуха. В этом направлении математическое моделирование является наиболее перспективным решением экологических задач.

2 Модели распространения выбросов

2.1 Анализ математических моделей распространения примесей от стационарных источников

В моделях определения качества воздуха в результате воздействия загрязняющих веществ используют математические и численные методы для моделирования физических и химических процессов. На основе входных метеорологических данных и информации об источнике выбросов, такой как количество выбросов и высота дымовой трубы, модели определяют характеристики основных загрязняющих веществ, которые выбрасываются непосредственно в атмосферу, а в некоторых случаях, вторичных загрязняющих веществ, которые образуются в результате сложных химических реакций в атмосфере. Ниже будут рассмотрены наиболее популярные модели качества воздуха.

2.1.1 Дисперсионные модели

Модели загрязнения воздуха являются ценным вспомогательным инструментом для регулирования качества выбросов вредных веществ в атмосферу. Наиболее эффективным методом исследования загрязнения воздуха является комбинированное использование измерений и моделирования.

Атмосферные модели дисперсии могут быть использованы для самых различных целей, которые не могут быть решены с использованием только измерений качества воздуха. Это оценка вклада различных источников в общую концентрацию веществ; оценка распределения концентраций вредных веществ в пространстве и воздействия на население; оптимизация стратегии сокращения выбросов и анализ сценариев распределения выбросов; прогнозирование возможного превышения концентрации; анализ репрезентативности измерительных станций.

В качестве исходных данных в моделях распространения примеси обычно вводятся: метеорологическая и географическая информация и данные о выбросах. Ошибочные результаты в моделях дисперсии могут быть связаны с неточностью при вводе входных значений; недостатками в моделировании физических и химических явлений; численными погрешностями моделей; нестабильностью атмосферы.

2.1.1.1 Классификация моделей загрязнения воздуха

Согласно [67], модели дисперсии можно разделить на несколько классов:

- 1) эйлеровы модели, которые численно решают уравнение атмосферной диффузии;
- 2) гауссовы модели, в которых распределение концентрации близко к нормальному распределению как по горизонтали, так и по вертикали;
- 3) модели Лагранжа, рассчитывают дисперсию с помощью распределения Лагранжа, в котором расчетные узлы движутся вместе с потоком;
- 4) полуэмпирические модели, которые в основном базируются на эмпирических параметрах;
- 5) вероятностные (стохастические) модели, основанные на полуэмпирических или статистических методах;
- 6) рецепторные модели, которые рассматривают наблюдаемые концентрации в точке рецептора и попытаются рассчитать вклады от различных источников.

Это только основные характерные типы моделей. Например, как эйлеровы и лагранжевы модели включают в себя, как правило, подмодели для сухого и мокрого осаждения, химического превращения и других процессов. Гауссовы модели могут также включать в себя подмодели для учета подъема и спада шлейфа выбросов, процессов осаждения и химических превращений.

Атмосферные дисперсионные модели описывают турбулентные процессы диффузии в атмосфере, это касается моделей 1-3 и частично 4 категории.

Дисперсионные модели могут быть классифицированы по масштабам атмосферных процессов:

- макромасштаб (более 1000 км), в котором атмосферный поток связан с синоптическими явлениями;
- мезомасштаб (от 1 км до 1000 км), в котором воздушный поток зависит частично от синоптических явлений и частично от гидродинамических эффектов (таких как шероховатость поверхности и препятствия);
- микромасштаб (менее 1 км), в котором воздушный поток в значительной степени зависит от характеристик поверхности.

В качестве альтернативы, модели дисперсии могут быть классифицированы как локальные (временной интервал менее часа), региональные (несколько часов), континентальные (несколько дней) и глобальные (более недели). Модели глобального масштаба предназначены, главным образом, для описания изменений химического и физического состава глобальной атмосферы.

2.1.1.2 Модели рассеивания в локальном масштабе

Основная цель моделей рассеивания локального масштаба состоит в количественной оценке концентраций загрязняющих веществ, которые могут вызвать неблагоприятные последствия для здоровья населения конкретного населенного пункта, или иногда для оценки влияния загрязнения воздуха на растительность. Модели, анализирующие распределение опасных веществ аварийных выбросов, обычно также относятся к моделям локального масштаба.

Локальные модели должны учитывать структуру приземного слоя атмосферы и различные локальные воздействия, такие как влияние зданий и препятствий, явления подъема и падения шлейфа. Последнее поколение моделей локального масштаба используется в сочетании с метеорологическими моделями предварительной обработки. Некоторые из моделей включают обработку химического превращения и осаждения. Локального масштаба модели также

были разработаны для описания конкретно дисперсию загрязнения воздушной среды.

2.1.1.3 Модели рассеивания в региональном масштабе

Модели рассеивания в региональном масштабе нацелены на количественную оценку концентрации и осадений соединений, вызывающих подкисление и эвтрофикацию, это соединения серы и азота. Региональные модели рассеивания также рассчитывают распределение концентраций тяжелых металлов, стойких органических загрязнителей, твердых частиц, радиоактивных и опасных материалов.

Мезомасштабные модели дисперсии должны включать в себя параметризацию атмосферного приземного слоя, учитывать особенности погодных условий, соответствующих мезомасштабу, сухое и влажное осадения и физико-химические превращений веществ, влияние орографии и неоднородностей поверхностного энергетического баланса.

Мезомасштабные модели загрязнения воздуха, как правило, состоят из модели ветра (которая описывает адвекции воздушных масс) и модель дисперсии. Модель ветра может быть диагностической или прогностической моделью.

2.1.1.4 Модели рассеивания в континентальном масштабе

Цели моделей дисперсии континентального масштаба, частично такие же, как и в региональном масштабе. Большинство континентальных моделей направлены на количественную оценку концентрации и осадений соединений, вызывающих подкисление и эвтрофикацию, фотоокислителей и радиоактивных материалов.

Модели рассеивания континентального масштаба должны включать в себя параметризацию атмосферного приземного слоя и учитывать соответствующие синоптические погодные условия. Для получения оценок дальнего переноса,

важно, чтобы учитывать адвекцию ветра и атмосферные условия диффузии, облачность и осадки, свойства подстилающей поверхности и физико-химические превращения. Например, сухие и влажные процессы осаждения зависят от погодных условий, химических превращений и структуры поверхности.

2.1.2 Рецепторные модели

Разработка стратегии улучшения качества воздуха требует понимания взаимосвязи между источниками вредных веществ и их воздействием на рецепторные участки. Это требует определения источников эмиссии загрязняющих веществ в воздухе, количественной оценки их уровня выбросов и получения знаний о рассеивании загрязняющих веществ в атмосфере и физико-химических процессов трансформации, происходящих во время этого рассеивания.

Источник-ориентированные или модели дисперсии могут быть использованы для прогнозирования концентрации загрязняющих веществ в воздухе на участке рецептора с использованием модели диффузии, объемов выбросов и метеорологических данных. Рецептор-ориентированные или рецепторные модели сосредоточены на реакции окружающей среды, в отличие от источник-ориентированных моделей, которые сосредоточены на переносе, распределении и преобразовании вещества на пути от источника к рецептору. Рецепторные модели оценивают вклад источника с использованием статистических процедур расчета на основе данных, собранных на различных участках. В отличие от фотохимических и дисперсионных моделей качества воздуха, рецепторные модели не используют данные о выбросах, метеорологические данные и химические механизмы трансформации. Вместо этого, модели рецепторов используют химические и физические характеристики газов и частиц, измеренных у источника и рецептора. Существует несколько видов рецепторных моделей. Например, модель химического баланса массы и многовариантная модель. Эти методы требуют многочисленного отбора проб

атмосферного воздуха. Последним, весьма перспективным методом является использование нейронной сети в сочетании с деревом регресса.

2.1.2.1 Модель химического баланса массы

В модели химического баланса массы используются данные о химическом составе частиц, измеренных в месте нахождения источника и рецептора, для идентификации присутствия загрязняющих веществ и количественной оценки вклада источников. Химические и физические характеристики измеряемых загрязняющих веществ должны быть такими, чтобы они находились в различных пропорциях в месте источника и рецептора, пропорции должны оставаться относительно постоянными для каждого типа источника. Исследуемые химические вещества не должны взаимодействовать друг с другом. Все потенциальные источники должны быть определены заранее, и их выбросы должны быть линейно независимы друг от друга. Подразумевается, что только инертные виды веществ могут быть приняты в качестве индикаторов в этом методе моделирования. Это ограничивает его использование для органических соединений, так как они могут реагировать во время атмосферного переноса.

2.1.2.2 Многовариантная рецепторная модель

Модель химического баланса массы требует, чтобы были известны все источники выбросов, во многих случаях это не представляется возможным. Эта проблема может быть решена с помощью многовариантной модели.

Почти во всех многовариантных моделях сначала производится определение основных загрязнителей. Полученные основные компоненты затем преобразуются. Основная цель анализа главных компонентов состоит в уменьшении числа переменных в наборе данных таким образом, что образуются новые, скрытые переменные. Таким образом, анализ главных компонентов используется в качестве технического средства для снижения размерности или

описания взаимосвязей между переменными. Факторный анализ с последующей множественной линейной регрессией дает оценку вкладов разных категорий источников в пробы, взятые на участке рецептора.

Многовариантные методы требуют большого количества наблюдений: чем больше, тем лучше. Если число наблюдений невелико, результаты, полученные в модели, будут не надежными.

2.1.2.3 Нейронные модели

Нейронные сети основаны на имитации процесса распознавания повторяющихся образов, который присущ человеческому мозгу. Были разработаны нейросети, которые идентифицируют синоптические условия, связанные с повышением уровня концентрации озона. Вероятно, такая же методика может быть применима и к другим загрязняющим веществам. Данные подходы являются более сложными, чем вышеописанные, но при этом они достаточно просты в реализации и использовании, требуют небольших вычислительных ресурсов и незначительных специальных знаний.

2.1.3 Статистические модели качества воздуха

Есть большое разнообразие статистических моделей оценки качества воздуха. Статистические модели могут быть нескольких типов, в том числе модели оперативной оценки и эмпирические модели.

Оперативные модели обычно состоят из уравнений, таблиц и графиков и обеспечивают упрощенную, часто некомпьютеризованную методику моделирования качества воздуха. Этот тип модели часто используется для обобщения ключевых результатов детального компьютерного моделирования рассеивания загрязняющих веществ в атмосфере.

Эмпирические модели качества воздуха не описывают причины дисперсии или трансформации загрязнителей воздуха в атмосфере. Эти модели основаны на

эмпирических зависимостях между измеренным качеством воздуха и параметрами, связанными с погодой и количеством выбросов.

2.1.3.1 Модели оперативной оценки

Модели для оперативного расчета могут быть использованы для изучения таких ситуаций как: краткосрочное воздействие выбросов от отдельного точечного источника на качество воздуха при критическом расположении рецептора: расположение, при котором выбросы оказывают наиболее серьезное воздействие; воздействие выбросов от отдельного точечного источника на рецептор на известном расстоянии от источника.

Краткосрочные моделирование предполагает самые суровые погодные условия и не требуют предоставления местной метеорологической информации. Долгосрочное моделирование обычно требует предоставления местной метеорологической информации, например, частота ветра по направлениям и его скорость и стабильность условий.

Модели предполагают, что места максимального воздействия отдельных источников не перекрываются. Это разумное предположение, за исключением очень крупных источников выбросов.

Оценка качества воздуха в ситуациях, в которых загрязняющие вещества фотохимически преобразуются, требует использования более сложных моделей качества воздуха и не может производиться с помощью этого типа моделей.

2.1.3.2 Эмпирические модели: прогнозирование загрязнения воздуха

Этот тип компьютерной модели, как правило, быстр и недорог в эксплуатации, но требует обширную базу данных исторического измерения качества воздуха и метеорологических данных. Основным ограничением модели такого типа является требование исторических данных. Модели должны быть настроены определять местоположение конкретной исторической информации.

2.2 Программные модели, реализованные на практике

Программная реализация математических моделей на практике представляет собой сложную систему, учитывающую различные факторы. Зачастую реализованные программы представляют из себя супер-модели, включающие в себя несколько подмоделей и модулей пре- и постобработки. Рассмотрим несколько основных моделей распространения примеси в атмосфере, в приложении А перечислены модели, так же распространенные в США, Европе, Канаде, Австралии и Индии.

2.2.1 Зарубежные модели распространения выбросов от стационарных источников

AERMOD (США) - стационарная модель дисперсии загрязнителей воздуха от стационарных промышленных источников, основанная на турбулентности приземного слоя атмосферы и концепции подобия приземных и возвышенных источников, а так же простого и сложного рельефа местности [68]. Модель предназначена для малой дальности (до 50 км) [69]. У модели имеется два входных обработчика данных, которые являются регуляторными компонентами системы моделирования AERMOD. Первый - AERMET, метеорологический препроцессор данных, который включает поверхностные метеорологические данные и аэрологические зондирования. Затем он вычисляет атмосферные параметры, необходимые для модели дисперсии, такие как характеристики атмосферной турбулентности, слои перемешивания, динамическую скорость, длину Монина-Обухова и поверхностный тепловой поток. Второй - AERMAP, препроцессор данных о местности, основной задачей которого является обеспечение физической взаимосвязи между особенностями рельефа и поведением шлейфов загрязнения воздуха. Он генерирует местоположение и высоту данных для каждого местоположения рецептора с использованием цифровых данных высотных отметок. Он также предоставляет информацию,

которая позволяет модели рассеивания имитировать поведение воздуха, протекающего через холмы или, расщепляясь, обтекать преграды. Другие не регуляторные компоненты этой системы включают в себя: AERSCREEN - вариант экранирования AERMOD; AERSURFACE - характеристики поверхности и BRIPPRIME - программу включения нескольких зданий.

AERMOD позволяет рассчитывать данные для различных типов источника: точечный, площадный и объемный; учитывать простой или сложный рельеф местности; позволяет регулировать тип осаждения частиц: сухое или влажное; принимает метеорологические данные из нескольких высот [70].

CALPUFF (США) - нестационарная модель слоевой дисперсии [71], которая имитирует эффекты во времени и пространстве при изменяющихся метеорологических условиях. CALPUFF может применяться на больших расстояниях от источника и для сложного рельефа местности. Она включает в себя алгоритм субрешеточной модели [72], а также, учитывает удаление вредных веществ из-за влажной продувки и сухого осаждения, химических превращений и влияние концентрации твердых частиц.

Интегрированная система моделирования состоит из трех основных компонентов, а также процессоров предварительной обработки и постобработки программ [73]. Основными компонентами системы моделирования являются Calmet (диагностическая 3-мерная метеорологическая модель), CALPUFF (модель рассеивания воздуха) и CALPOST (пакет постобработки) [74, 75]. Каждая из этих программ имеет графический пользовательский интерфейс. В дополнение к этим компонентам, существует множество других процессоров, которые могут быть использованы для получения геофизических данных, метеорологических данных, а также интерфейсы к другим моделям.

ADMS 3 (Великобритания) - модель атмосферной дисперсии, предназначенная для расчета концентраций загрязняющих веществ, выбрасываемых непрерывно от точечного, линейного, объемного или площадного

источника, или дискретно из точечных источников. Модель включает в себя алгоритмы, которые учитывают следующие эффекты: застройка участка; мокрое осаждение, гравитационное осаждение и сухое осаждение; краткосрочные колебания концентрации; химические реакции; радиоактивный распад и гамма-дозы; подъем шлейфа в зависимости от расстояния; время усреднения в диапазоне от очень коротких интервалов до года; метеорологический препроцессор [76].

Модель способна имитировать пассивные или плавучие непрерывные шлейфы, а также краткосрочные (аварийные) выбросы. Атмосферная турбулентность двумя параметрами: высотой пограничного слоя и длиной Мони́на-Обухова.

ADMS 3 может одновременно моделировать выбросы из 100 источников, из которых до 100 могут быть точечными, до 6 - линейными, площадными или объемными.

Последняя версия (ADMS 5) позволяет использовать до 300 источников (до 300 точечных источников, 30 линейных, 30 площадных и 30 объемных источников).

CALINE3 (США) является стационарной гауссовой моделью дисперсии, разработанной для определения концентрации загрязнения воздуха в относительно несложной местности [77]. CALINE3 включена в более усовершенствованные модели CAL3QHC и CAL3QHCR. Модели, на основе CALINE3 имеют некоторые проблемы при использовании для моделирования распространения выбросов от мобильных источников. В этих моделях невозможно использовать текущие метеорологические данные. Кроме того, применение модели CAL3QHCR для 24-часового и годового расчета требует многократных прогонов, так как используется достаточно длительный период метеорологических данных. Модели CALINE могут моделировать только выбросы от линейных источников, которые ограничивают их применение. Они не могут быть использованы для любого другого типа мобильных источников,

например при моделировании проекта, который включает в себя стоянку или грузовой и транзитный терминал.

CTDMPLUS (США) – стационарная модель для точечного источника. Модель имитирует искажения потока и шлейфа вблизи заданных пользователем трехмерных свойств местности, основана на гауссовой модели [78]. Алгоритмы стабильных и почти нейтральных условий основаны на демонстрируемой концепции раздельного обтекания [79]. Эти алгоритмы были разработаны с использованием данных из основных полевых исследований ограниченного шлейфа и ряда исследований моделирования потока жидкости. Алгоритмы для шлейфов, выбрасываемых в конвективные слои основаны на свойствах конвективного пограничного слоя на основе моделирования потока жидкости, численного моделирования и полевых исследований. В модели учитывается вертикальная дисперсия и боковая дисперсия. Модель требует полное трехмерное описание индивидуальных особенностей рельефа для оценки искажений потока (шлейфа). Оценки параметров поверхностного слоя и глубина перемешанного слоя необходимы для определения состояния пограничного слоя.

ISC3 (США) - гауссова модель используется для оценки концентрации загрязняющих веществ из широкого спектра источников, связанных с промышленным комплексом. Эта модель учитывает оседание и сухое осаждение частиц; точечные, площадные, линейные и объемные источники; подъем шлейфа в зависимости от подветренной стороны; ограниченные параметры местности. ISC3 работает как в долгосрочных, так и в краткосрочных режимах прогнозирования [80].

В качестве исходных данных для краткосрочного прогнозирования ISC требуется исходные данные источника (размеры источника, мощность выбросов, высота труб) и ежечасные усредненные метеорологические данные (температура окружающей среды, направление и скорость ветра, класс устойчивости атмосферы, высота слоя смешения).

NAME (Великобритания) - используется для прогнозирования качества воздуха, дисперсии загрязнения воздуха и кислотных дождей; отслеживания радиоактивных выбросов и сбросов вулканического пепла; анализа случайных выбросов загрязнителей воздуха; долгосрочного анализа воздействия на окружающую среду.

NAME (текущая версия NAME III) представляет собой модель Лагранжа для расчета дисперсии загрязнителей от локальных до глобальных масштабов [81]. Используются трехмерные метеорологические данные, предоставленные Национальным Метеорологическим бюро Великобритании. Для представления турбулентного перемешивания используются методы случайного блуждания с использованием эмпирических данных. В сущности, NAME исследует трехмерные траектории участков шлейфа загрязнения и вычисляет концентрацию загрязняющих веществ с помощью методов Монте-Карло, то есть путем прямого моделирования, а не решения уравнений.

NAME использует слоевую технику при моделировании дисперсии в течение короткого диапазона времени, это сокращает время, необходимое для вычисления концентраций загрязняющих веществ в месте нахождения рецептора.

Модель имеет возможность учитывать: подъем плавучего шлейфа; осаждение шлейфа компонентов загрязнения из-за осадков (т.е. влажного осаждения), сухое осаждение; химию серо- и азотосодержащих выбросов; эффекты зданий и заграждений.

DISPERSION21 (Швеция) - гауссова модель для оценки выбросов загрязнителей воздуха из существующих или планируемых промышленных и городских источников в местном масштабе, не включает в себя влажное или сухое осаждение, сложный химический состав атмосферы и влияние сложного рельефа местности [82].

Некоторые из основных функций и возможностей DISPLAY21:

Типы источников: точечный (в том числе множественный), площадный и объемный источник, а также уличные каньоны.

Типы шлейфов: непрерывный или прерывистый плавучий шлейфы.

Дисперсия шлейфа: Гауссова модель с использованием функции Грина, включает в себя многократные отражения.

Типы местности: простая местность с перепадом не более 10 градусов.

Модель включает в себя препроцессор метеорологических параметров, необходимый для характеристики атмосферной турбулентности.

Модуль «уличный каньон» включает в себя некоторую химию атмосферы для фотохимических реакций.

PANACHE (Франция) - пакет программного 3-D гидродинамического обеспечения, предназначен для имитации случайного или непрерывного промышленного и городского рассеивания загрязняющих веществ в атмосферу [83]. Он имитирует рассеивание выбросов токсичных/легковоспламеняющихся веществ при различных погодных условиях с учетом турбулентных полей. Приложение охватывает очень небольшую площадь - до 10 км, где комплексный характер потока, связанный с препятствиями и топографией вычисляется в явном виде.

Существуют так называемые, это скрининг-модели, необходимые как правило для определения необходимости применения более точных моделей определения качества воздуха. Основные скрининг-модели: AERSCREEN, COMPLEX1, CTSCREEN, RTDM3.2, SCREEN3, TSCREEN, VALLEY и VISCREEN [84]. Рассмотрим некоторые из них.

AERSCREEN - это модель на основе AERMOD, производит оценку концентраций без потребности в метеорологических данных, в отличие от AERMOD, требующей полный набор метеорологических данных. Модель производит оценки наихудшей концентрации при различных временных интервалах – от 1 часа до года [85].

VALLEY - гауссова модель дисперсии для оценки 24-часовой или годовой концентрации в результате выбросов от нескольких (до 50) точечных и площадных источников, учитывает сложный рельеф местности [86].

Complex1 - модель распространения примеси от точечного источника с регулировкой характеристик местности [87].

RTDM3.2 - гауссова модель для оценки приземных концентраций одного или нескольких совмещенных точечных источников на плоской местности.

2.2.2 Модели распространения выбросов, разработанные в РФ

В России существует множество методик расчета распространения выбросов, основанных на различных моделях рассеивания примеси (лагранжева модель, гауссова модель и др.), а также разработанных уже на основе готовых программных продуктах [88-99]. Однако, они являются исследовательскими работами и не получили широкого распространения на практике. Вместо этого в России существует и используется модель распространения выбросов, основанная на эмпирических параметрах, ОНД-86. Эта модель рассчитывает концентрации компонентов первичных выбросов в локальном масштабе. Модели, описанные в работах [88, 91, 95, 89] основаны только на расчете процесса образования вторичных выбросов и анализе изменении концентрации со временем. Такие модели применимы только для залповых выбросов для ограниченной территории, например территории завода, в безветренную погоду. В моделях не рассматривается распространение выбросов в пространстве даже в условиях городской среды, т.е. на небольшие расстояния. Хотя известно, что выбросы, первичные и вторичные, способны распространяться на сотни и даже тысячи километров от источника загрязнения. Особенно опасны в этом плане вторичные выбросы, так как они являются причиной осадков повышенной кислотности.

В ходе анализа моделей найдена единственная оценочная модель, основанная на принципе максимальной опасности и простом алгоритме счета, которая рассчитывает поле концентраций первичных выбросов на малых и

больших расстояниях [100]. Результаты, рассчитанные по алгоритму этой модели, близки к расчетам по методике ОНД-86 и к данным мониторинга. Но в отличие от ОНД-86, модель не ограничивает расчеты расстояние в несколько километров, а позволяет оценить максимальные расстояния, на которые способны распространяться выбросы от стационарного источника. Рассмотрим эти две методики расчета.

2.2.2.1 ОНД-86

Приземная концентрация вредных веществ при отхождении газовойоздушной смеси от точечного одиночного источника с круглым отверстием имеет максимальное значение при наихудших метеорологических условиях на расстоянии x_m , м, от источника [101]. Значение концентрации в этом максимуме c_m , мг/м³, определяют по формуле:

$$c_m = \frac{A \cdot M \cdot F \cdot n \cdot m \cdot \eta}{H^2 \sqrt[3]{V \Delta T}}, \quad (3)$$

где A - эмпирический коэффициент, зависящий от температурной стратификации атмосферы;

M – мощность выброса вредного вещества, г/с;

F - эмпирический коэффициент, характеризующий скорость оседания загрязняющих веществ в атмосферном воздухе;

m и n – эмпирические коэффициенты, характеризующие условия выхода газовойоздушной смеси из источника выброса;

H - высота трубы (источника) над уровнем земли, м; для наземных источников при расчетах принимают $H=2$ м;

η - эмпирический коэффициент, характеризующий влияние рельефа местности, в случае ровной или слабопересеченной местности с перепадом высот, не превышающим 50 м на 1 км, $\eta = 1$;

ΔT - разность между температурой выбрасываемой газовойоздушной смеси T_2 и температурой окружающего атмосферного воздуха $T_в$, °С;

V_1 - расход газовойздушной смеси, м³/с, определяемый по формуле:

$$V_1 = \frac{\pi D^2}{4} w_0, \quad (4)$$

где D – диаметр отверстия источника выброса, м;

w_0 - средняя скорость выброса газовойздушной смеси из источника выброса, м/с.

2.2.2.2 Модель распространения первичных выбросов во внешней зоне влияния металлургического предприятия, основанная на принципе максимальной опасности

В работе [100] рассмотрена простая модель распространения, имеющая своим прообразом модель Фишера для зернограничной диффузии, она позволяет учесть три воздействия, происходящие в одно и то же время и приводящие к изменению концентрации загрязняющего вещества с увеличением расстояния от места его выброса в атмосферу: диффузионное, ветровое и химическое. Будем считать, что при наличии ветра со средней скоростью $\bar{v}$ вдоль определенного направления, все вещество, выбрасываемое в атмосферу, полностью захватывается ветром и переносится им, т.е. все количество вещества газового выброса на протяжении того времени, пока ветер направлен в данном направлении (вдоль оси x) движется также вдоль оси x . Путь выноса вещества в этом случае называется «ветровым коридором». Шириной ветрового коридора δ считается размер предприятия вдоль оси y , перпендикулярной оси x . Таким образом, предполагается, что источником вредного вещества является только само предприятие и что все содержание выбросов захватывается и уносится ветром.

В модели предполагается, что имеется поток газообразного вещества-компонента газовых выбросов I_x вдоль направления ветра x (рисунок 10). Движущими силами перемещения компонента вдоль оси x являются ветер и

диффузия. Кроме того, учитывается, что диффузия происходит и вдоль направления y , то есть перпендикулярно ветровому коридору, перпендикулярно направлению распространения вещества. Концентрация газообразного вещества уменьшается со временем вследствие участия его в химической реакции с компонентами атмосферы.

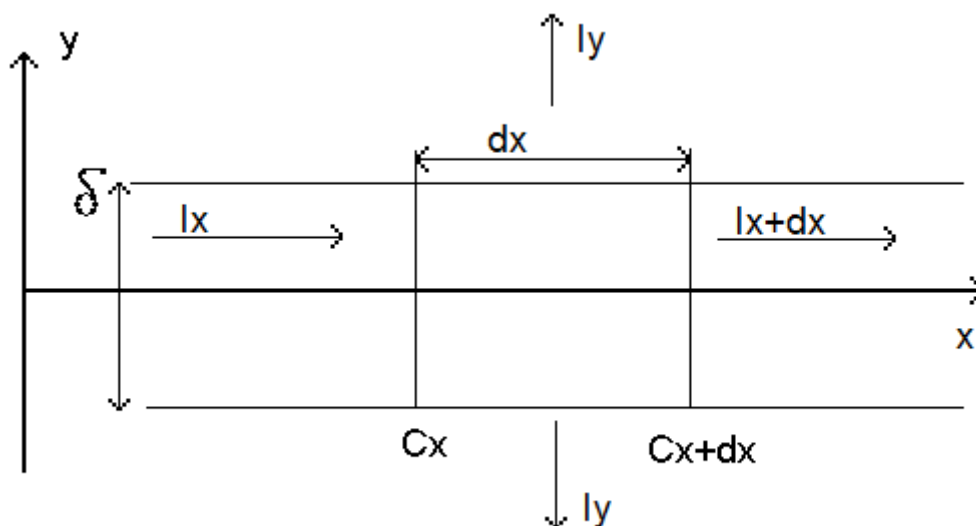


Рисунок 10 – Ветровой коридор выноса газовых компонентов выбросов

Изменение концентрации загрязнителя в интервале dx связано с прохождением вещества вдоль оси x и оттока его в стороны от оси x , вдоль направления y .

Баланс вещества в интервале dx описан формулой:

$$(C_x - C_{x+dx})dx \cdot \delta = (I_{x+dx} - I_x)\delta \cdot dt - 2I_y dx \cdot dt, \quad (5)$$

где C_x и C_{x+dx} - концентрации загрязняющего вещества в координатах x и $x+dx$. Предполагается, что при заданном x концентрацию внутри ветрового коридора в интервале $-\frac{\delta}{2} \leq y \leq \frac{\delta}{2}$ можно считать постоянной;

I_x и I_{x+dx} - значение потока вдоль оси x в координатах x и $x+dx$;

I_y - значение потока по оси y в точках $y = \pm \frac{\delta}{2}$.

Разделим уравнение (5) на $\delta \cdot dx \cdot dt$ и рассмотрим основные составляющие потоков I_x и I_y .

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -\frac{\partial I_x}{\partial x} - \frac{2}{\delta} I_y. \quad (6)$$

Считается, что поток I_x это сумма частных потоков, определяющихся по отдельности тремя воздействиями: диффузионным, ветровым и химическим. Вдоль направления x имеются все три воздействия.

$$I_x = I_{ветр.} + I_{дифф.} + I_{хим.};$$

при этом $I_{ветр.}$ – ветровая составляющая I_x

$$I_{ветр.} = \bar{v} \cdot C,$$

$I_{дифф.}$ – диффузионная составляющая I_x

$$I_{дифф.} = -D \frac{\partial C}{\partial x},$$

где D – коэффициент диффузии загрязняющего вещества в атмосфере.

$I_{хим.}$ – составляющая I_x , она связана с кинетикой химической реакции:

$$I_{хим.} = kCdx,$$

где k – константа скорости химической реакции загрязняющего вещества с компонентами атмосферы.

Поток I_y при $y = \pm \frac{\delta}{2}$ можно представить как:

$$I_y = -D \frac{\partial C}{\partial y} \Big|_{y=\pm \frac{\delta}{2}}$$

При подстановке I_x и I_y в уравнение (6) имеем:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -\bar{v} \frac{\partial C}{\partial x} + D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - kC + \frac{2}{\delta} D \frac{\partial C}{\partial y} \Big|_{y=\pm \frac{\delta}{2}}. \quad (7)$$

Рассмотрение распространения загрязнителя вне ветрового коридора с учетом действия диффузии и химии и при учете, что источником вещества является лишь пространство ветрового коридора, позволяет получить выражение:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial y^2}. \quad (8)$$

В первом приближении считается, что в уравнении (7) диффузией вдоль оси x возможно пренебречь. Действительно путь, который проходит вещество под действием ветра ($S_{ветр.} = \bar{v} \cdot t$) при $\bar{v} = 1 \text{ м/с}$ за 1 час равен 3600 м; диффузионный путь, за это же время, соответствующий снижению концентрации в e раз, $S_{дифф.} = 2\sqrt{Dt}$ ($D = 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$) равен 1,2 м. Делается еще одно допущение, позволяющее упростить решение задачи: не рассматривается вклад химии при распространении вещества вне ветрового коридора.

В итоге для определения поля концентрации во всем пространстве используется система уравнений:

$$\begin{cases} \frac{\partial C(x)}{\partial t} = -\bar{v} \frac{\partial C(x)}{\partial x} - kC(x) + \frac{2}{\delta} D \frac{\partial C(x, y)}{\partial y} \Big|_{y=\pm \frac{\delta}{2}}, \\ \frac{\partial C(x, y)}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C(x, y)}{\partial y^2} \end{cases}, \quad (9)$$

с граничными условиями:

$$C(x=0; y \in (-\frac{\delta}{2}; \frac{\delta}{2})) = C_0,$$

$$C(x; y = \pm \frac{\delta}{2}) = C(x).$$

Аналогично решению задачи Фишера для зерно-границной диффузии решение второго уравнения системы (9) записывается в следующем виде:

$$C(x, y, t) = C(x) \operatorname{erfc} \frac{y}{2\sqrt{Dt}}. \quad (10)$$

Решение первого уравнения системы (9) можно получить в квазистационарном случае, то есть будем считать, что в ветровом коридоре через определенное время после начала распространения вещества устанавливается стационарное распределение концентраций, т.е. $\frac{\partial C(x)}{\partial t} = 0$. Подставим решение (10) в первое уравнение системы, для чего найдем значение следующего выражения

$$\frac{2}{\delta} D \frac{\partial C(x, y, t)}{\partial y} \Big|_{y=\pm \frac{\delta}{2}} = -C(x) \frac{2D}{\delta \sqrt{\pi Dt}} \exp\left(-\frac{\delta^2}{16Dt}\right).$$

Первое уравнение системы (9) можно записать в виде:

$$-\bar{v} \frac{\partial C(x)}{\partial x} - kC(x) - b \cdot C(x) = 0, \quad (11)$$

где $b = \frac{2D}{\delta\sqrt{\pi Dt}} \exp(-\frac{\delta^2}{16Dt})$.

Решая уравнение (11), получим:

$$C(x) = C_0 e^{-\frac{k+b}{\bar{v}}x}. \quad (12)$$

Уравнения (10) и (12) позволяют рассчитывать поле концентраций загрязняющего вещества газообразных выбросов при заданных условиях.

Для получения наглядной картины зависимости максимальной концентрации заданного компонента от расстояния (удаленности от источника выброса) по восьми географическим направлениям восьми румбам розы ветров, то есть получения поля концентрации компонента в географических координатах в зависимости от мощности выброса и химической активности компонента – необходимо знание розы ветров региона расположения металлургического предприятия. Получение полной информации по распределению каждого компонента с помощью розы ветров позволяет совместить данные о максимально возможных (максимально опасных) концентраций каждого компонента с географической картой местности расположения конкретного предприятия (с нанесением на карту изоконцентрационных линий). Это дает возможность построить прогнозную карту-схему стационарного распределения для любого из компонентов выбросов.

Таким образом, использование исходных данных, а именно: мощности выброса компонента, химической активности компонента, геометрических размеров предприятия (схемы его расположения) и розы ветров на местности расположения предприятия для определенного периода времени, – позволяет посредством принципа максимальной опасности получить карту-схему поля концентрации во внешней зоне влияния, сделать прогноз максимальной концентрации и вероятности ее достижения в любой географической точке региона на восьми лучах направлений света.

Адекватность результатов расчета концентрации первичного загрязнителя в атмосфере данным методом была доказана в [100]. В таблице 10 дается сравнение максимальных концентраций полученных при расчете по данной методике, методике «ОНД-86» для ОАО «НЛМК» за 2008 год, мг/м^3 и данных регионального мониторинга города Липецк за 2008 год.

Таблица 10 – Сравнение максимальных концентраций, полученных при расчете по предложенной методике, методике «ОНД-86» для ОАО «НЛМК» за 2008 год, мг/м^3 и данных импактного мониторинга г. Липецка за 2008 год

Компоненты выбросов	Предложенная методика C_{ij}^m , мг/м ³		Методика «ОНД-86» C_m , мг/м ³	Городской импактный мониторинг		
	Направление ветра			Максим. разовая конц., мг/м ³	Среднегодовая конц., мг/м ³	Миним. Конц., мг/м ³
	С–В	Ю–З				
CO	3,22	2,46	3,28	1	0,8	0,4
SO ₂	0,25	0,19	0,25	0,1	0,024	<0,08
NO ₂	0,084	0,064	0,086	0,08	0,05	0,03
NO	0,038	0,029	0,039	0,018	0,011	<0,016

Заключение по главе 2

Рассмотренные модели в большей мере универсальны, но не конкретизированы для определенных задач. Универсальность заключается в применении набора алгоритмов к множеству различных задач. Специализированных программ моделирования распределения вредных веществ в атмосфере значительно меньше. Логично, что модели, предназначенные для решения конкретного типа задач способны решать эти задачи эффективнее универсальных моделей. А повышение эффективности моделей позволяет производить более сложные математические расчеты и повышать точность результатов.

В результате анализа моделей распространения выбросов установлено, что на практике моделирование процессов распространения примеси связано с большим числом факторов и требует значительных вычислительных ресурсов,

прежде всего это связано с необходимостью решать системы уравнений большой размерности.

При этом среди всего многообразия существующих и реализованных на практике моделей распространения выбросов от стационарных источников нет моделей, адаптированных (предназначенных) для анализа распространения выбросов от предприятий металлургической отрасли. Нет моделей, основанных на простом алгоритме расчета, позволяющих проводить оценку при проектировании или изменении сырьевой базы на предприятиях черной металлургии.

Нет моделей, предназначенных для расчета образования и распространения вторичных загрязняющих веществ от стационарных источников выбросов, которые можно использовать при проектировании или изменении технологических процессов.

3 Вторичные загрязнители. Основные принципы. Способ численного расчета

3.1 Развитие модели первичных выбросов

Для каждого географического региона существуют розы ветров, характеризующие ветровые характеристики для различных периодов времени. Розы ветров кроме средних скоростей ветра по каждому из восьми румбов содержат также фактор повторяемости – η_j – долю времени (в %), в течение которого ветер дует в направлении данного румба. Этот параметр имеет смысл вероятности или длительности сохранения максимального значения концентрации в течение периода времени, соответствующего розе ветров.

В работе [100] не взят в учет тот факт, что роза ветров каждого региона имеет выраженное временное изменение (в течение года, сезона, месяца, недели, суток). Среднегодовая карта-схема распространения выбросов несет статистическую информацию. На практике для определения опасности превышения концентраций вредных веществ в атмосфере в определенный период года необходимо использовать для расчета сезонные, месячные розы ветров или текущие данные о погоде. Соответственно для использования расчетов на практике для каждого временного периода должно быть получено пространственное распределение максимально возможных концентраций каждого компонента выбросов, совмещенное с географической картой местности расположения металлургического комплекса (предприятия) – т.е. прогнозная карта для данного вещества на данный период времени.

Приведем пример использования предлагаемого подхода для разных временных отрезков в течение года. Нами проведена оценка концентрации оксида азота NO_2 в результате его распространения при выбросах в атмосферу региона г. Магнитогорска Челябинской области Магнитогорским Металлургическим Комбинатом (ОАО «ММК») в течение 2012 года. В качестве исходных данных были использованы: мощность выбросов NO_2 , составляющая в 2012 году 15651

т/год [102]; средняя площадь территории ОАО «ММК», с помощью которой был рассчитан средний размер предприятия, составляющий 12278 м; эффективный коэффициент химической активности NO_2 в атмосфере, равный по данным, приведенным в работе [64], 0,00002 1/с, ежемесячная роза ветров г. Магнитогорска Челябинской области [103], приведенная в таблице 11, и повторяемость ветров (таблица 12).

Таблица 11 – Средняя роза ветров г. Магнитогорска

Направление	Месяц											
	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12
с	2	3	4	2	6	6	4	4	3	2	2	3
с-в	1	4	6	5	6	5	5	5	4	4	5	4
в	2	4	2	5	5	4	5	5	2	2	4	4
ю-в	2	1	2	2	5	3	4	3	2	2	3	3
ю	3	2	2	6	5	3	5	5	4	4	4	2
ю-з	2	2	4	6	4	5	4	4	4	5	4	5
з	1	6	4	8	6	6	5	4	5	5	5	4
с-з	1	1	5	5	5	6	6	5	3	5	3	3

Таблица 12 – Повторяемость ветров г. Магнитогорска

Направление	Месяц											
	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12
с	0,10	0,03	0,07	0,03	0,10	0,27	0,03	0,07	0,23	0,07	0,07	0,04
с-в	0,07	0,13	0,13	0,20	0,07	0,13	0,13	0,20	0,10	0,10	0,07	0,24
в	0,03	0,07	0,10	0,03	0,19	0,07	0,23	0,13	0,07	0,02	0,10	0,14
ю-в	0,23	0,13	0,17	0,03	0,03	0,03	0,03	0,07	0,03	0,02	0,02	0,02
ю	0,10	0,20	0,23	0,07	0,13	0,03	0,10	0,07	0,07	0,07	0,20	0,12
ю-з	0,24	0,23	0,23	0,27	0,13	0,10	0,10	0,17	0,20	0,41	0,34	0,32
з	0,20	0,17	0,07	0,30	0,19	0,04	0,26	0,17	0,20	0,21	0,20	0,12
с-з	0,03	0,03	0,03	0,03	0,16	0,13	0,13	0,13	0,10	0,13	0,02	0,04

С помощью уравнения (3) была найдена максимальная концентрация компонента на выходе с предприятия, которая реализуется при ветровом пространственном переносе данного компонента вдоль j -го направления розы ветров со скоростью ветра w_j . Данные расчетов представлены в таблице 13.

Таблица 13 – Значения максимальных концентраций NO_2 на выходе с предприятия, рассчитанные по данным ОАО «ММК» за 2012 год, в зависимости от месяца и розы ветров.

Направление	Месяц											
	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12
с	0,20	0,13	0,10	0,20	0,07	0,07	0,10	0,10	0,13	0,20	0,20	0,13
с-в	0,40	0,10	0,07	0,08	0,07	0,08	0,08	0,08	0,10	0,10	0,08	0,10
в	0,20	0,10	0,20	0,08	0,08	0,10	0,08	0,08	0,20	0,20	0,10	0,10
ю-в	0,20	0,40	0,20	0,20	0,08	0,13	0,10	0,13	0,20	0,20	0,13	0,13
ю	0,13	0,20	0,20	0,07	0,08	0,13	0,08	0,08	0,10	0,10	0,10	0,20
ю-з	0,20	0,20	0,10	0,07	0,10	0,08	0,10	0,10	0,10	0,08	0,10	0,08
з	0,40	0,07	0,10	0,05	0,07	0,07	0,08	0,10	0,08	0,08	0,08	0,10
с-з	0,40	0,40	0,08	0,08	0,08	0,07	0,07	0,08	0,13	0,08	0,13	0,13

Согласно решению стационарной модели – уравнению (2) – для каждого из восьми направлений розы ветров были рассчитаны расстояния от места выброса (ОАО «ММК») до точек, значение концентрации NO_2 в которых уменьшается до среднесуточной предельно допустимой концентрации (ПДК_{сс}). Рассчитанные значения приведены в таблице 14.

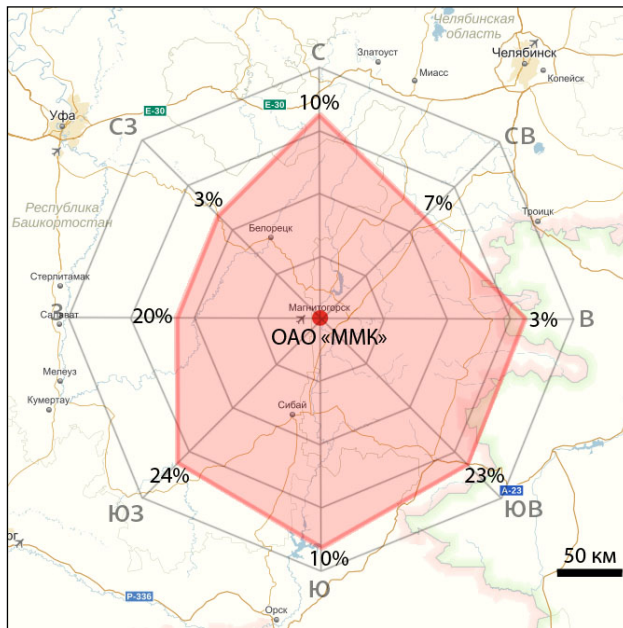
Таблица 14 – Расстояния, на которых уровень концентрации NO_2 достигает значения ПДК_{сс}, рассчитанные по данным ОАО «ММК» за 2012 год, в зависимости от месяца и розы ветров.

Направление	Месяц											
	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12
с	162	182	185	162	156	156	185	185	182	162	162	182
с-в	116	185	156	176	156	176	176	176	185	185	176	185
в	162	185	162	176	176	185	176	176	162	162	185	185
ю-в	162	116	162	162	176	182	185	182	162	162	182	182
ю	182	162	162	156	176	182	176	176	185	185	185	162
ю-з	162	162	185	156	185	176	185	185	185	176	185	176
з	116	156	185	93	156	156	176	185	176	176	176	185
с-з	116	116	176	176	176	156	156	176	182	176	182	182

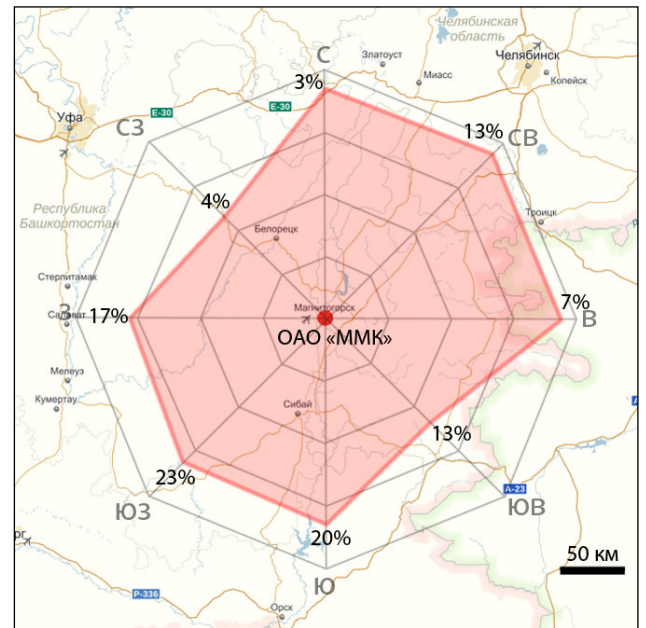
Линии, соединяющие значения концентрации NO_2 , равные $ПДК_{СС}$ по разным направлениям и образующие замкнутые восьмиугольные фигуры, нанесены на карту Челябинской области, что показано на рисунке 11. В процентах указаны вероятности появления и сохранения максимальных концентраций по каждому из направлений. Все территории внутри линий $ПДК_{СС}$ могут в течение интервала времени, для которого действует использованная для расчета роза ветров, подвергаться воздействию NO_2 с концентрацией, превышающей предельно допустимую. Видно, что эти территории по форме и размерам отличаются друг от друга для различных месяцев года (см. рисунок 11 а, б, в, г). Причиной этого является изменение характеристик ветра в течение года, которое определяется географическими особенностями расположения анализируемого предприятия.

Представленный пример показывает, что предлагаемый общий подход позволяет делать обоснованные прогнозы пространственного стационарного распределения компонентов газовых выбросов металлургических предприятий на расстояниях в десятки и сотни раз превышающих размеры самих предприятий для различных временных интервалов.

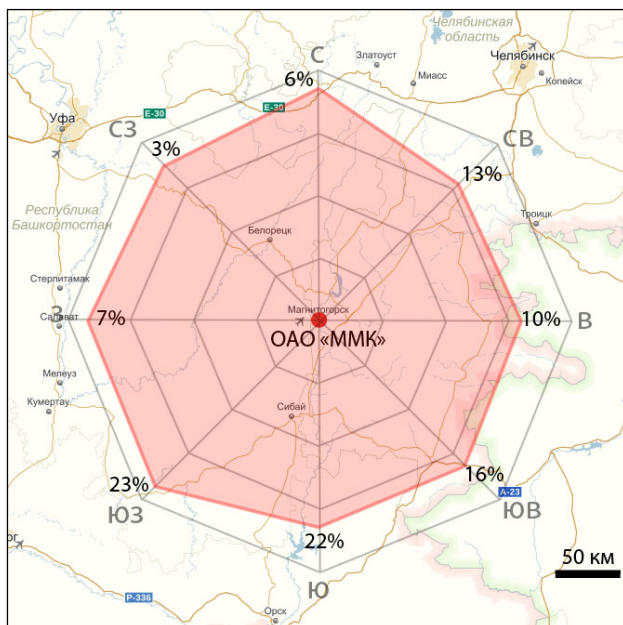
В рассмотренной модели остался нерешенный вопрос, который, нельзя обойти при анализе вредного воздействия промышленных газовых выбросов на населенные пункты и природу в зонах влияния индустриальных центров. Это вопрос образования и распространения вторичных выбросов (вторичных загрязнителей), появляющихся при химическом взаимодействии самих компонентов выбросов (первичных выбросов) с веществами внешней среды. Такое взаимодействие с одной стороны снижает концентрацию первичных выбросов, что уменьшает размер зоны их влияния. С другой стороны при этом образуются вторичные газовые вещества, также обладающие токсичными свойствами и распространяющиеся в окружающем пространстве. Учет распространения вторичных выбросов может позволить уточнить и, возможно, расширить границы зон влияния предприятий.



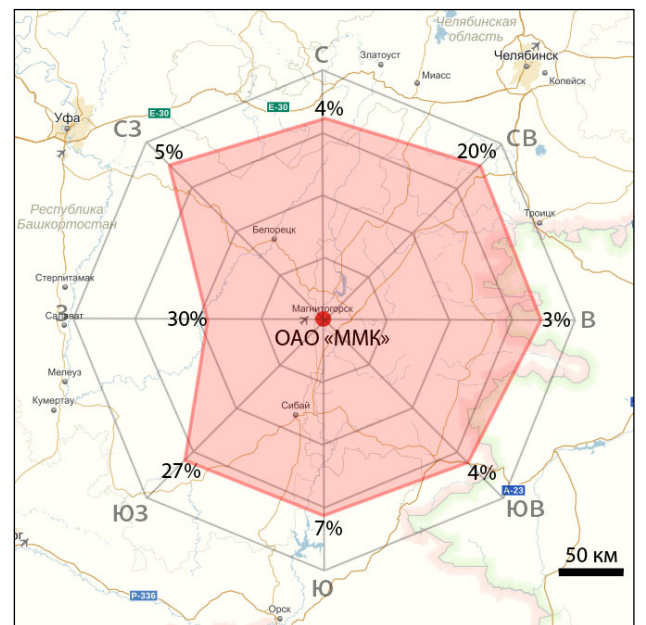
(а)



(б)



(в)



(г)

Рисунок 11 – Распределение концентраций NO_2 по восьми направлениям ветра для ОАО «ММК» в январе (а), феврале (б), марте (в) и апреле (г)

3.2 Основные положения модели образования и распространения вторичных загрязнителей

3.2.1 Зоны влияния металлургических предприятий

Характеры распространения компонентов газовых выбросов вблизи металлургических предприятий и на удаленном от них расстоянии существенно отличаются. Основной причиной этого отличия является большое влияние рельефа местности (профиля подстилающей поверхности) и рельефа промышленных и жилых построек на процесс распространения на небольших расстояниях от места выброса и преобладание других факторов на значительных расстояниях. Вблизи источника выбросов, там, где концентрации компонентов выбросов велики, следует учитывать инфраструктуру предприятия и жилой застройки, наличие ограждений и продуваемых открытых коридоров, а так же рельеф самой земной поверхности. Сложная геометрия подстилающей поверхности вызывает появление неоднородностей в распределении компонентов выбросов. Поэтому вблизи источников выбросов будут наблюдаться значительные перепады концентрации вследствие наличия местных преград. Вместе с тем на значительных расстояниях – десятки и сотни километров – в силу большого числа случайных причин эти неоднородности распределения нивелируются, сглаживаются. Поле концентраций становится более однородным, в нем исчезают области с резкими перепадами (большими градиентами концентраций).

В связи с вышеизложенным разделим условно зону влияния предприятий на две (неравные части). Территорию самого предприятия и прилегающие районы в его непосредственной близости, где проживают люди, работающие на предприятии, находятся смежные промышленные площадки, транспортные узлы и другие службы, необходимые для бесперебойной работы металлургического комплекса обозначим внутренней зоной влияния. Остальное пространство зоны влияния, растянувшееся на сотни километров и находящееся вне внутренней зоны

– назовем внешней зоной влияния. Внутренняя зона влияния отличается большими перепадами концентраций, на соседних участках, разделенных всего несколькими метрами, концентрации вредных веществ могут отличаться в несколько раз. Для этой зоны необходимо построение детального поля концентрации, зависящего от многих внешних параметров: скорости ветра, перепада температур (в цеховом пространстве), влажности воздуха, геометрических размеров и формы зданий и т.д. Большое количество частных факторов можно учитывать с использованием в системе расчета некоторых эмпирических поправок. Для внутренней зоны влияния, которая для крупных металлургических комбинатов может иметь размеры до нескольких десятков километров, существуют опробованные расчетные системы анализа концентраций вредных веществ в воздушной среде, учитывающие большое количество факторов, влияющих на распространение выбросов. К таким системам относится ОНД-86 [101] – система, получившая широкое распространение на территории России. Имея исходные данные, с помощью ОНД-86 можно получить точные значения концентраций в любой заданной точке внутренней зоны, иначе говоря, получить поле концентраций компонентов выбросов для внутренней зоны влияния. Система рассчитывает максимальную концентрацию выбросов при средней скорости ветра в соответствии с розой ветров и температурными данными для данного региона, а также с использованием дополнительных подгоночных параметров. За рубежом получили распространение другие системы расчета концентраций газовых выбросов в воздухе вблизи промышленных предприятий, основанные, например, на Гауссовой модели [71].

Следует отметить, что при всей безусловной полезности точных компьютерных расчетов, которые проводятся для внутренней зоны влияния с помощью стандартизированных систем типа ОНД-86, полученное поле концентраций является среднестатистическим приближением к реальному распределению концентраций. Так, если скорость ветра в данное конкретное время превышает среднюю величину, то концентрация в одних местах может оказаться ниже, а в других – выше расчетной. При уменьшении скорости ветра во

всей внутренней области влияния концентрация везде будет возрастать, а в период полного затишья она станет наибольшей – вещество с выбросами продолжает поступать, но не выносится во внешнюю зону.

Методики расчета для внутренней зоны влияния ограничиваются расстоянием в несколько десятков километров и не годятся для расчетов концентраций выбросов вредных веществ во внешней зоне влияния производственного предприятия. Принято считать, что выбросы вредных веществ на расстояниях в несколько сотен километров от источника не представляют особой опасности. Поэтому стандартные системы расчета рассчитаны на расстояния до 100 км. Однако данные мониторинга показывают, что это не так, например, соединения серы могут распространяться на расстояния, иногда превышающие тысячу километров от источника выбросов. Не имея системы расчета для внешней зоны влияния, нельзя оценить опасность, которой подвергаются населенные пункты, находящиеся на удаленном расстоянии от металлургических центров. Попытка решения этой проблемы с помощью многофакторной задачи, аналогичной вышеописанным системам расчета, не имеет смысла. Значение концентрации каждого компонента в любой точке поля и в любой момент времени испытывает постоянные флуктуации по причине постоянно изменяющихся атмосферных факторов. Амплитуда этих флуктуаций зависит от пространственных координат и от времени. Поэтому окончательного точного значения концентрации вредного вещества во всей внешней зоне влияния (также как и во внутренней зоне) получить расчетным путем невозможно. С другой стороны, с ростом расстояния от источника территория, на которой требуется определить распределение концентраций (общая площадь поля концентраций), резко возрастает, численный расчет с учетом большого количества варьируемых подгоночных параметров многократно усложняется. Особенно, если для прогноза желательно получить полную картину распространения выбросов. Кроме того, поле концентраций во внешней зоне влияния будет локально более однородным, чем во внутренней зоне влияния, и большое количество параметров для его описания не требуется.

Таким образом, задача распространения компонентов выбросов во внешней зоне влияния переходит (перерастает) в задачу построения среднестатистического поля концентраций каждого из компонентов выбросов.

3.2.2 Принцип максимальной опасности

Построение принципиальной основы схемы прогнозирования распределения концентраций компонентов выбросов во внешней зоне влияния требует решения главного вопроса: какое значение концентрации необходимо рассчитывать для определения уровня опасности распространяющегося вещества – значение в каждой точке пространства внешней зоны влияния для каждого момента времени (непрерывно зависящее от времени – мгновенное значение), среднее за заданный промежуток времени или нечто иное? Значение средней величины концентрации в течение некоторого времени не дает полной информации о возможном риске, т.к. какое-то время концентрация может превышать среднюю, а значит и опасность для человека может быть более высокой, чем та, которая соответствует среднему значению концентрации.

В работе [100] использован метод прогнозирования распространения газовых выбросов во внешней зоне влияния металлургических комбинатов, основанный на принципе максимальной опасности. Этот принцип заключается в следующем: общий анализ опасности повышения концентрации вредных (токсичных) газовых выбросов должен включать в себя оценку верхней границы возможных значений концентрации. Согласно данному методу при прогнозировании максимально возможной концентрации вредных веществ необходимо отбрасывать все факторы, локально снижающие концентрацию и определять вероятность реализации этой максимальной концентрации для заданных координат и времени. Таким образом, поле концентраций газовых выбросов внешней зоны влияния должно характеризоваться минимально двумя параметрами в каждой точке: максимальной концентрацией и вероятностью появления этой концентрации (долей времени, длительностью сохранения этой концентрации).

Принцип максимальной опасности (максимального риска) позволяет выделить несколько основных факторов, определяющих процессы распространения первичных выбросов (первичных загрязняющих веществ) во внешней зоне влияния. Количественные значения этих факторов требуются для построения стационарных пространственных полей наибольших возможных концентраций опасных компонентов выбросов. Для каждого компонента первичных веществ такими факторами являются: мощность выброса i -го компонента - m_i [кг/с], которая контролируется самим предприятием и приводится в официальных отчетных документах; ветровой фактор (средние скорости ветра v_j и фактор повторяемости в направлении j , которые приводятся в розе ветров региона предприятия); концентрация данного вещества при выходе его с территории предприятия - C_i^0 ($C_i^0 = m_i/(v_j S)$, где S – площадь, через которую происходит вынос данного компонента); химический фактор, количественной мерой которого является константа скорости реакции k_1 перехода вещества первичного выброса (первичного вещества) в вещество (вещества) вторичного выброса (вторичные вещества). Константа k_1 может быть определена из среднего времени жизни данного вещества в воздухе, полученного в результате длительных наблюдений. Времена жизни веществ, содержащихся в промышленных выбросах, приведены в различных литературных источниках [64].

3.2.3 Факторы определения концентрации

Максимальная концентрация определяется, главным образом, мощностью выброса, количеством вещества данного i -го компонента m_i , поступающего в атмосферу в единицу времени. Назовем эту величину **образующим фактором**. Образующий фактор приводит к увеличению концентрации данного компонента во всей зоне влияния. Далее компонент выброса поступает в каждую точку зоны влияния под действием процессов переноса в воздушной среде, которые можно назвать **факторами переноса**. К основным факторам переноса можно отнести

природные движения воздушных масс, индивидуальные для каждого географического региона. Основное перемещение молекул всех компонентов воздуха осуществляется под действием ветра – ветровой перенос. Для описания среднестатистических перемещений молекул, содержащих в воздухе, под действием ветра удобно использовать розу ветров, соответствующую рассматриваемой области. Следует учитывать одну универсальную особенность концентрационных полей компонентов выбросов при их формировании под действием ветрового переноса – отсутствие пространственной радиальной поворотной симметрии относительно точки выброса. Это означает, что концентрации компонентов выбросов на одинаковых расстояниях от места выброса (места их поступления в атмосферу), но по разным направлениям – по восьми румбам розы ветров – различны.

Дополнительно к факторам переноса следует отнести процесс молекулярной диффузии, который существует даже при отсутствии ветра и везде одинаков по своей интенсивности, независимо от погодных условий. Однако диффузионные процессы по интенсивности не могут конкурировать с воздействием ветра. Это следует из соотношения расстояний диффузионного переноса L_d и ветрового переноса L_w за одно и тоже время t :

$$\frac{L_d}{L_w} = \frac{2\sqrt{Dt}}{wt},$$

где D – коэффициент диффузии газовых молекул в воздухе ($D \approx 0,1 \div 1 \text{ см}^2/\text{с}$). При умеренной скорости ветра 2 м/с при $t = 1 \text{ ч}$. $L_d / L_w \approx 1 \cdot 10^{-4}$. Данное отношение расстояний переноса приблизительно соответствует вкладу диффузии в величину концентрации, то есть этот вклад не превышает 0,01% . При увеличении скорости ветра и временного интервала, для которого производится анализ поля концентрации, этот вклад становится еще меньше. Поэтому в качестве фактора переноса концентрации достаточно использовать процесс ветрового переноса.

В любой точке внешней зоны влияния металлургического предприятия при стационарном установившемся процессе распространения выбросов существует

баланс вещества. В силу одних причин в каждую точку поступает некоторое количество вредного вещества (компонента выброса). В силу других – концентрация вредных веществ снижается. Основным фактором снижения концентрации является *химический фактор*. Компоненты выбросов с различной химической активностью, попадая в открытое воздушное пространство, взаимодействуют и с компонентами атмосферы. Химические реакции могут происходить с момента попадания выбросов в атмосферу или же при появлении необходимых условий для протекания реакций. Кроме того, молекулы адсорбируются поверхностью пылевых частиц, впоследствии оседают на поверхность земли, водоемов, поглощаются растительным покровом и вымываются осадками. Учет всех этих процессов требует построения сложных моделей взаимодействия, индивидуальных для каждого компонента в отдельности. Однако, для основных компонентов выбросов можно использовать эффективные константы скорости разложения (распада) данного (*i*-го) компонента в воздушной среде - k_i , которые отражают суммарную скорость всех процессов, составляющих химический фактор. Эффективные константы k_i экспериментально определялись на протяжении нескольких десятков лет в различных лабораториях мира и для многих компонентов газовых выбросов их значения имеются в литературных источниках [64]. Значения k_i , для различных компонентов выбросов различны.

Химический фактор можно считать основным фактором уменьшения концентраций компонентов выбросов в воздушной среде. Он не подвержен влиянию природных процессов и определяется лишь активностью самого компонента, распространение которого необходимо проанализировать. Остальные факторы падения концентрации – восходящие потоки воздуха, местные воздушные течения, конвективные процессы и т.д. – являются природно-обусловленными факторами и проявляются локально. Эти явления носят случайный характер, они могут присутствовать на пути распространения компонентов выбросов и снижать концентрации компонентов, но могут и

отсутствовать. Учет их при расчете максимальной концентрации компонентов выбросов не требуется.

Таким образом, согласно принципу максимальной опасности целесообразно использовать три фактора, определяющих величину концентрации компонента выброса во внешней зоне влияния: образующий фактор m_i , т.е. мощность выброса каждого i -го компонента, ветровой фактор, как фактор распространения всех компонентов выбросов в пространстве внешней зоны влияния и химический фактор k_i – фактор уменьшения концентрации каждого i -го компонента выбросов со временем.

3.2.4 Непрерывный пространственно-распределенный источник

В данной работе предлагается метод, позволяющий проводить анализ вторичных выбросов и получать стационарные поля концентраций компонентов вторичных выбросов, совмещенные с географией внешней зоны влияния металлургического предприятия.

Основные принципы расчета концентраций вторичных выбросов содержатся в следующих позициях. Во-первых, любое вторичное вещество, появляющееся в атмосфере, является продуктом реакции компонента первичного выброса с компонентами атмосферы. То есть в отличие от первичных загрязнителей, которые поступают в атмосферу уже в готовом виде, для образования в атмосфере любого компонента вторичного выброса необходимо нахождение в атмосфере вещества-предшественника. Поэтому анализ вторичных выбросов возможен только, если имеется стационарное поле концентраций первичных выбросов. Причем, для каждого компонента вторичных выбросов, есть основной компонент первичных выбросов, который является химической базой, истоком данного вторичного вещества. Например, если проводится построение поля концентрации вторичной серной кислоты, то необходимо иметь уже построенное поле концентраций первичного серосодержащего выброса (SO_2).

Во-вторых, образование вторичного вещества происходит в каждой точке воздушного пространства, где есть повышенная, по сравнению с фоновым значением, концентрация первичного компонента (повышенная концентрация SO_2 , если мы анализируем распространение вторичной H_2SO_4). Значит, источником вторичного выброса является пространство, которое содержит избыточное количество соответствующего первичного компонента. Поэтому дальнейший анализ распределения вторичного вещества требует использования модели *непрерывного пространственно-распределенного источника*, которую мы используем в расчете. Сложностью использования этой модели является невозможность получения полного аналитического решения задачи, которое по заданным исходным данным позволяет однозначно определить зависимость концентрации вторичного выброса от пространственной координаты (т.е. рассчитать расстояние от заданного пункта – собственно от источника всех выбросов, металлургического комбината, – до места с заданной концентрацией вдоль любого румба розы ветров). С другой стороны оказывается возможным подготовить алгоритм для компьютерного счета концентраций вторичных выбросов. Компьютерное решение задачи определения концентраций вторичных выбросов осуществляется на стандартных, уже имеющихся расчетных программах, создание новых программных продуктов не требуется.

В-третьих, метод расчета вторичных загрязнителей основан на принципе максимальной опасности, поэтому внешние факторы, изменяющие концентрацию и перемещающие образующееся во всем пространстве зоны влияния предприятия вторичное вещество остаются теми же, что и для веществ первичных выбросов. Это – ветер, диффузия и химическое взаимодействие с окружающей средой. Молекулы вторичного вещества, появившиеся в некоторой точке при взаимодействии первичного вещества с реагентами атмосферы, переносятся в следующую расчетную точку по лучу румба розы ветров и на пути также взаимодействуют с воздушной средой, из-за чего их количество уменьшается. В точке, куда они поступили в уменьшенном количестве, дополнительно возникают новые молекулы этого же вещества, и общее их количество является суммой

молекул, поступивших по ветру, и появившихся вновь в этой точке. Процесс перехода от точки к точке многократно повторяется, что позволяет рассчитать концентрацию вторичного вещества на любом расстоянии от места поступления первичного выброса в атмосферу. Аналогичные расчеты, проведенные для восьми румбов местной (для данного комбината) розы ветров дают численный материал для составления поля концентрации вторичного выброса и построения прогнозной карты-схемы с изоконцентрационными линиями этого вещества, показывающими его концентрацию по отношению к ПДК_{СС} в любом месте географического региона расположения предприятия.

3.3 Численная модель образования и распространения вторичных загрязнителей

В поле концентраций первичного выброса проводится 8 радиус-векторов из области, где расположено предприятие, как из центра (8 лучей), в соответствии с географическими направлениями розы ветров. Рассматривается один из лучей. Производится разбиение луча на мелкие участки, длиной Δx каждый. Каждой n -ой точке разбиения, расположенной на определенном расстоянии от центра, сопоставляется концентрация первичного выброса, соответствующая этому расстоянию - C_{An} (здесь и далее индексами A и B обозначены первичные и вторичные выбросы соответственно). В начальный момент времени концентрация первичного загрязнителя определяется средней мощностью выброса вещества в единицу времени - m_A , мг/с, скоростью ветра v , м/с, и площадью выноса выброса S , м². Площадью выноса считаем сечение ветрового коридора, высотой $h=100$ метров (высота трубы) и шириной δ (диаметр предприятия), по которому вещество выброса поступает в воздушное пространство.

$$C_{A0} = \frac{m_A}{vS}. \quad (13)$$

Согласно модели первичных выбросов, разработанной ранее в НИТУ «МИСиС», концентрация первичного загрязнителя на расстоянии x от источника выбросов определяется по формуле:

$$C_{An} = C_{A0} e^{-\frac{k_A + b_A}{v} x}, \quad (14)$$

где k_A – константа скорости окисления вещества А в атмосфере;

b_A – величина, характеризующая диффузионный перенос. Согласно [100] b можно найти по формуле:

$$b_A = \frac{2D}{\delta \sqrt{\pi D t}} e^{\frac{-\delta^2}{16 D t}}, \quad (15)$$

где D – коэффициент диффузии вещества А в воздухе;

Способ расчета концентрации вторичного вещества в зависимости от дальности от места поступления первичного вещества в атмосферу, состоит в следующем: на каждом участке разбиения n определяется, сколько в единице объема первичного вещества убыло при прохождении пути, равного Δx :

$$\Delta C_{An} = C_{A(n-1)} - C_{An}, \quad (16)$$

и сколько вторичного вещества на этом пути образовалось:

$$\Delta C_{Bn} = \Delta C_{An} \frac{M_B}{M_A}. \quad (17)$$

К следующему участку $(n+1)$ порция, образовавшаяся на предыдущем участке n , приходит под действием ветра, испытывая при этом на пути Δx воздействие химического фактора, т.е. в уменьшенном количестве. Согласно формулам (16), (17) в это же время в точке $(n+1)$ образуется некоторое дополнительное количество кислоты ΔC_{Bn} . Таким образом, количество вторичного загрязнителя в любой точке n можно рассчитать по следующей формуле:

$$C_{Bn} = C_{B(n-1)} e^{-\frac{k_B + b_B}{v} \Delta x} + \Delta C_{Bn}, \quad (18)$$

где k_B – константа скорости «удаления» вторичного загрязнителя из атмосферы;

b_B – величина, характеризующая диффузионный перенос:

$$b_B = \frac{2D_B}{\delta \sqrt{\pi D_B t}} \exp\left(\frac{-\delta^2}{16 D_B t}\right), \quad (19)$$

D_B – коэффициент диффузии вещества В в воздухе.

Другими словами, на каждом участке суммируются все порции, пришедшие из предшествующих участков, и прибавляется количество вторичного вещества, образовавшееся на данном участке. В результате можно сформулировать алгоритм, пригодный для численного расчета концентрации вторичного вещества на каждом участке Δx (в каждой точке) вдоль направления x . Он имеет следующий вид:

$$\begin{aligned}
 C_{B0} &= 0, \\
 C_{B1} &= \Delta C_{B1} \\
 C_{B2} &= \Delta C_{B1} \left(e^{-\frac{k_B + b_B}{v} \Delta x} \right) + \Delta C_{B2}, \\
 C_{B3} &= \Delta C_{B1} \left(e^{-\frac{k_B + b_B}{v} \Delta x} \right)^2 + \Delta C_{B2} \left(e^{-\frac{k_B + b_B}{v} \Delta x} \right) + \Delta C_{B3}, \\
 C_{B4} &= \Delta C_{B1} \left(e^{-\frac{k_B + b_B}{v} \Delta x} \right)^3 + \Delta C_{B2} \left(e^{-\frac{k_B + b_B}{v} \Delta x} \right)^2 + \Delta C_{B3} \left(e^{-\frac{k_B + b_B}{v} \Delta x} \right) + \Delta C_{B4}, \\
 &\dots
 \end{aligned}$$

или для $n=2 \dots N$:

$$C_{Bn} = \sum_{i=1}^{n-1} \Delta C_{Bi} \exp \left(-\frac{(k_B + b_B)(n-1)\Delta x}{v} \right) + \Delta C_{Bn}. \quad (20)$$

Найдя концентрацию искомого вторичного вещества в каждой точке вдоль заданного направления x розы ветров можно определить зависимость концентрации этого вещества от расстояния от нулевой точки (местоположения выброса первичного вещества). Далее ту же процедуру можно проделать для всех восьми направлений розы ветров географического региона предприятия, чьи газовые выбросы подлежат рассмотрению. Таким способом определяется пространственное стационарное поле концентраций вторичного вещества, сопутствующего любому из компонентов первичных газовых выбросов.

Для расчета вышеописанным методом необходимо применение стандартных компьютерных программ, применяемых для решения математических задач, типа Mathcad, MATLAB, Mathematica. Задача с таким алгоритмом решается даже с помощью Microsoft Excel.

3.4 Результаты численного расчета поля концентраций вторичных загрязнителей ММК

Проанализируем процесс образования и распространения вторичных загрязнителей для ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» (ОАО «ММК») на примере серной кислоты. По данным [104, 102, 105], представленным в таблице 15, видно, что объем выбросов предприятия ОАО «ММК» практически не изменяется с годами. Для расчетов мы будем использовать данные 2013 года.

Таблица 15 – Выбросы основных загрязняющих веществ в атмосферу ОАО «ММК» за 2011, 2012 и 2013 года, тыс. тонн

Вещество	Год		
	2011	2012	2013
SO ₂	16,20	16,13	16,10
NO _x	15,65	15,59	15,58
Аммиак	0,44	0,44	0,44
H ₂ S	0,06	0,06	0,06
CO	153,63	153,53	153,51
Фенол	0,10	0,10	0,10
Пыль	26,37	26,29	26,14
Всего	212,45	212,14	211,93

Определим концентрацию первичного загрязнителя в начальный момент времени.

$$C_{A0} = \frac{m_A}{vS}. \quad (21)$$

Средняя площадь территории ОАО «ММК» составляет 118,4 км² [102]. Для простоты будем считать, что территория, на которой расположено предприятие имеет форму круга, диаметром d , тогда диаметр этого круга или диаметр предприятия можно рассчитать по формуле:

$$d = 2 \sqrt{\frac{S_{\text{завода}}}{\pi}} = 2 \sqrt{\frac{118,4 * 10^6}{\pi}} = 12278 \text{ м.}$$

Площадью выноса будем считать сечение ветрового коридора, высотой $h=100$ метров (высота трубы) и шириной d (диаметр предприятия), по которому вещество выброса поступает в воздушное пространство.

Данные, рассчитанные по формуле (21) для разных скоростей ветра приведены в таблице 16.

Таблица 16 – Значения начальной концентрации первичного вещества в зависимости от скорости ветра по данным ООО «ММК» за 2013 год

Скорость ветра, м/с	1	2	3	4	5
C_{A0}	0,4024	0,2012	0,1341	0,1006	0,0805

Для получения поля концентраций первичного загрязнителя воспользуемся формулой:

$$C_{An} = C_{A0} e^{-\frac{k_A + b_A}{v} x}. \quad (22)$$

Вклад b_A величину концентрации составляет менее 0,01% [100], поэтому для дальнейших расчетов упростим формулу:

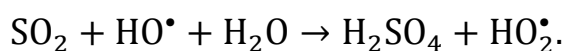
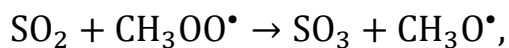
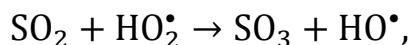
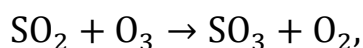
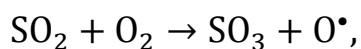
$$C_{An} = C_{A0} e^{-\frac{k_A}{v} x}. \quad (23)$$

Полученные значения концентраций первичного выброса для разных скоростей ветра, рассчитанные вдоль румба розы ветров с шагом 20 км, приведены в таблице 17.

Таблица 17 – Значение максимальных концентрация первичного загрязнителя SO₂, рассчитанные по данным ООО «ММК» за 2013 год, в зависимости от скорости ветра и удаленности от источника выбросов

Расстояние, км	Скорость ветра, м/с				
	1	2	3	4	5
0	0,402	0,201	0,134	0,101	0,080
20	0,346	0,187	0,128	0,097	0,078
40	0,298	0,173	0,121	0,093	0,076
60	0,257	0,161	0,115	0,090	0,074
80	0,221	0,149	0,110	0,087	0,071
100	0,190	0,138	0,104	0,083	0,069
120	0,164	0,128	0,099	0,080	0,067
140	0,141	0,119	0,095	0,077	0,065
160	0,121	0,110	0,090	0,075	0,063
180	0,104	0,102	0,086	0,072	0,061
200	0,090	0,095	0,081	0,069	0,060
220	0,077	0,088	0,077	0,067	0,058
240	0,067	0,082	0,074	0,064	0,056
260	0,057	0,076	0,070	0,062	0,054
280	0,049	0,070	0,067	0,060	0,053
300	0,042	0,065	0,063	0,057	0,051
320	0,037	0,061	0,060	0,055	0,050
340	0,031	0,056	0,057	0,053	0,048
360	0,027	0,052	0,055	0,051	0,047
380	0,023	0,048	0,052	0,049	0,046
400	0,020	0,045	0,049	0,048	0,044
420	0,017	0,042	0,047	0,046	0,043
440	0,015	0,039	0,045	0,044	0,042
460	0,013	0,036	0,042	0,042	0,040
480	0,011	0,033	0,040	0,041	0,039
500	0,009	0,031	0,038	0,039	0,038
520	0,008	0,029	0,037	0,038	0,037
540	0,007	0,027	0,035	0,037	0,036
560	0,006	0,025	0,033	0,035	0,035
580	0,005	0,023	0,031	0,034	0,034
600	0,004	0,021	0,030	0,033	0,033
620	0,004	0,020	0,028	0,031	0,032
640	0,003	0,018	0,027	0,030	0,031
660	0,003	0,017	0,026	0,029	0,030
680	0,002	0,016	0,025	0,028	0,029
700	0,002	0,015	0,023	0,027	0,028
720	0,002	0,014	0,022	0,026	0,027
740	0,002	0,013	0,021	0,025	0,027
760	0,001	0,012	0,020	0,024	0,026
780	0,001	0,011	0,019	0,023	0,025
800	0,001	0,010	0,018	0,022	0,024

Определим вещество, которое будем рассматривать в качестве вторичного выброса. Ниже приведены реакции SO_2 с основными окислительными компонентами земной атмосферы [64]:



Видно, что вторичными выбросами являются SO_3 и H_2SO_4 . Однако, образовавшийся при окислении триоксид с большой скоростью [64] превращается в серную кислоту по реакции:



Время жизни триоксида составляет примерно 10^{-5} с. В свою очередь время жизни H_2SO_4 оценивается величиной около 50 часов [64]. Поэтому примем допущение, что в результате химических реакций вся сера из диоксида переходит в кислоту. Общая скорость окисления SO_2 , полученная эмпирическим путем, равна $k_{\text{SO}_2} = 0,027 \text{ ч}^{-1}$ [64], эта же величина, с учетом принятых нами допущений, является скоростью образования кислоты.

Используя поле концентраций первичного выброса SO_2 для ОАО «ММК» за 2013 год, рассчитаем значения поля концентраций вторичного выброса, являющегося продуктом реакции оксида серы с окружающей средой. Как и при расчете первичных выбросов, упростим формулу (20), пренебрегая вкладом b_A в величину концентрации, получим:

$$C_{Bn} = \sum_{i=1}^{n-1} \Delta C_{Bi} \exp\left(-\frac{k_B(n-1)\Delta x}{v}\right) + \Delta C_{Bn}. \quad (24)$$

Рассчитанные по формуле (24) значения приведены в таблице 18.

Аналогичные расчеты были проведены для веществ NO_x и HNO_3 . Рассчитанные значения концентраций представлены в таблицах 19 и 20.

Таблица 18 – Значение максимальных концентраций вторичного загрязнителя H_2SO_4 , рассчитанные по данным ООО «ММК» за 2013 год, в зависимости от скорости ветра и удаленности от источника выбросов

Расстояние, км	Скорость ветра, м/с				
	1	2	3	4	5
0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
20	0,086	0,022	0,010	0,006	0,004
40	0,151	0,042	0,019	0,011	0,007
60	0,198	0,059	0,028	0,016	0,010
80	0,232	0,073	0,035	0,021	0,013
100	0,255	0,086	0,042	0,025	0,016
120	0,269	0,096	0,048	0,029	0,019
140	0,275	0,105	0,054	0,033	0,022
160	0,276	0,113	0,059	0,036	0,024
180	0,273	0,119	0,064	0,039	0,027
200	0,267	0,124	0,068	0,042	0,029
220	0,258	0,128	0,071	0,045	0,031
240	0,247	0,131	0,075	0,048	0,033
260	0,235	0,133	0,077	0,050	0,035
280	0,223	0,134	0,080	0,052	0,036
300	0,210	0,134	0,082	0,054	0,038
320	0,197	0,134	0,084	0,056	0,039
340	0,184	0,134	0,085	0,057	0,041
360	0,171	0,133	0,086	0,059	0,042
380	0,159	0,131	0,087	0,060	0,043
400	0,147	0,130	0,088	0,061	0,044
420	0,136	0,128	0,088	0,062	0,045
440	0,125	0,125	0,089	0,063	0,046
460	0,115	0,123	0,089	0,064	0,047
480	0,106	0,120	0,089	0,064	0,048
500	0,097	0,117	0,089	0,065	0,049
520	0,089	0,114	0,088	0,065	0,049
540	0,081	0,111	0,088	0,066	0,050
560	0,074	0,108	0,087	0,066	0,050
580	0,068	0,105	0,086	0,066	0,051
600	0,062	0,102	0,086	0,066	0,051
620	0,056	0,099	0,085	0,066	0,052
640	0,051	0,096	0,084	0,066	0,052
660	0,046	0,093	0,083	0,066	0,052
680	0,042	0,089	0,082	0,066	0,052
700	0,038	0,086	0,081	0,066	0,053
720	0,035	0,083	0,079	0,065	0,053
740	0,031	0,080	0,078	0,065	0,053
760	0,028	0,077	0,077	0,065	0,053
780	0,026	0,074	0,076	0,064	0,053
800	0,023	0,072	0,074	0,064	0,053

Таблица 19 – Значение максимальных концентраций первичного загрязнителя NO_x , рассчитанные по данным ООО «ММК» за 2013 год, в зависимости от скорости ветра и удаленности от источника выбросов

Расстояние, км	Скорость ветра, м/с				
	1	2	3	4	5
0	4,16E-01	2,08E-01	1,39E-01	1,04E-01	8,32E-02
10	2,82E-01	1,71E-01	1,22E-01	9,43E-02	7,69E-02
20	1,91E-01	1,41E-01	1,07E-01	8,56E-02	7,12E-02
30	1,29E-01	1,16E-01	9,40E-02	7,77E-02	6,59E-02
40	8,78E-02	9,55E-02	8,25E-02	7,05E-02	6,09E-02
50	5,95E-02	7,86E-02	7,25E-02	6,39E-02	5,64E-02
60	4,03E-02	6,47E-02	6,37E-02	5,80E-02	5,22E-02
70	2,73E-02	5,33E-02	5,59E-02	5,26E-02	4,83E-02
80	1,85E-02	4,39E-02	4,91E-02	4,78E-02	4,46E-02
90	1,26E-02	3,61E-02	4,32E-02	4,33E-02	4,13E-02
100	8,51E-03	2,97E-02	3,79E-02	3,93E-02	3,82E-02
110	5,77E-03	2,45E-02	3,33E-02	3,57E-02	3,54E-02
120	3,91E-03	2,02E-02	2,93E-02	3,24E-02	3,27E-02
130	2,65E-03	1,66E-02	2,57E-02	2,94E-02	3,03E-02
140	1,80E-03	1,37E-02	2,26E-02	2,67E-02	2,80E-02
150	1,22E-03	1,13E-02	1,98E-02	2,42E-02	2,59E-02
160	8,25E-04	9,26E-03	1,74E-02	2,19E-02	2,40E-02
170	5,59E-04	7,63E-03	1,53E-02	1,99E-02	2,22E-02
180	3,79E-04	6,28E-03	1,34E-02	1,81E-02	2,05E-02
190	2,57E-04	5,17E-03	1,18E-02	1,64E-02	1,90E-02
200	1,74E-04	4,26E-03	1,04E-02	1,49E-02	1,76E-02
210	1,18E-04	3,50E-03	9,11E-03	1,35E-02	1,62E-02
220	8,00E-05	2,88E-03	8,00E-03	1,22E-02	1,50E-02
230	5,43E-05	2,37E-03	7,03E-03	1,11E-02	1,39E-02
240	3,68E-05	1,96E-03	6,18E-03	1,01E-02	1,29E-02
250	2,49E-05	1,61E-03	5,42E-03	9,15E-03	1,19E-02
260	1,69E-05	1,33E-03	4,77E-03	8,30E-03	1,10E-02
270	1,15E-05	1,09E-03	4,19E-03	7,53E-03	1,02E-02
280	7,76E-06	8,98E-04	3,68E-03	6,83E-03	9,42E-03
290	5,26E-06	7,40E-04	3,23E-03	6,20E-03	8,72E-03
300	3,57E-06	6,09E-04	2,84E-03	5,63E-03	8,07E-03
310	2,42E-06	5,01E-04	2,49E-03	5,10E-03	7,46E-03
320	1,64E-06	4,13E-04	2,19E-03	4,63E-03	6,90E-03
330	1,11E-06	3,40E-04	1,92E-03	4,20E-03	6,39E-03
340	7,53E-07	2,80E-04	1,69E-03	3,81E-03	5,91E-03
350	5,10E-07	2,30E-04	1,48E-03	3,46E-03	5,47E-03
360	3,46E-07	1,90E-04	1,30E-03	3,14E-03	5,06E-03
370	2,34E-07	1,56E-04	1,15E-03	2,85E-03	4,68E-03
380	1,59E-07	1,29E-04	1,01E-03	2,58E-03	4,33E-03
390	1,08E-07	1,06E-04	8,84E-04	2,35E-03	4,01E-03
400	7,30E-08	8,71E-05	7,76E-04	2,13E-03	3,71E-03

Таблица 20 – Значение максимальных концентраций вторичного загрязнителя HNO_3 , рассчитанные по данным ООО «ММК» за 2013 год, в зависимости от скорости ветра и удаленности от источника выбросов

Расстояние, км	Скорость ветра, м/с				
	1	2	3	4	5
0	0	0	0	0	0
10	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
20	0,183	0,050	0,023	0,013	0,009
30	0,298	0,090	0,043	0,025	0,016
40	0,366	0,122	0,060	0,035	0,023
50	0,404	0,147	0,074	0,045	0,030
60	0,420	0,166	0,087	0,053	0,036
70	0,424	0,180	0,097	0,061	0,041
80	0,419	0,191	0,106	0,067	0,046
90	0,408	0,199	0,114	0,073	0,051
100	0,394	0,204	0,120	0,078	0,055
110	0,379	0,207	0,125	0,082	0,058
120	0,362	0,209	0,129	0,086	0,061
130	0,345	0,209	0,132	0,090	0,064
140	0,328	0,208	0,134	0,092	0,067
150	0,311	0,206	0,136	0,095	0,069
160	0,295	0,204	0,137	0,097	0,072
170	0,280	0,201	0,138	0,099	0,073
180	0,265	0,198	0,139	0,100	0,075
190	0,251	0,194	0,139	0,101	0,076
200	0,238	0,190	0,138	0,102	0,078
210	0,225	0,186	0,138	0,103	0,079
220	0,213	0,182	0,137	0,103	0,080
230	0,201	0,178	0,136	0,104	0,081
240	0,191	0,174	0,135	0,104	0,081
250	0,180	0,170	0,133	0,104	0,082
260	0,171	0,166	0,132	0,103	0,082
270	0,161	0,162	0,130	0,103	0,082
280	0,153	0,157	0,129	0,103	0,083
290	0,144	0,153	0,127	0,102	0,083
300	0,137	0,149	0,125	0,102	0,083
310	0,129	0,145	0,124	0,101	0,083
320	0,122	0,142	0,122	0,101	0,083
330	0,116	0,138	0,120	0,100	0,083
340	0,109	0,134	0,118	0,099	0,082
350	0,103	0,131	0,116	0,098	0,082
360	0,098	0,127	0,115	0,097	0,082
370	0,093	0,124	0,113	0,096	0,081
380	0,088	0,120	0,111	0,095	0,081
390	0,083	0,117	0,109	0,095	0,081
400	0,078	0,114	0,107	0,094	0,080

Рассмотрим подробнее полученные результаты на примере серной кислоты. На рисунке 12 показано распределение вторичного выброса H_2SO_4 в зависимости от расстояния от источника первичного выброса. Черным обозначено количество образовавшейся кислоты в точке i за временной промежуток, разделяющий точки i и $(i-1)$. С увеличением расстояния от источника первичного выброса количество вторичного выброса, образующегося в каждой следующей точке, постепенно уменьшается, так как уменьшается количество компонента-предшественника. Серым цветом обозначено количество кислоты в точке i , перешедшей из точки $(i-1)$. Видно, что количество вещества перешедшего из предыдущей точки уменьшилось. Это произошло за счет химического фактора.

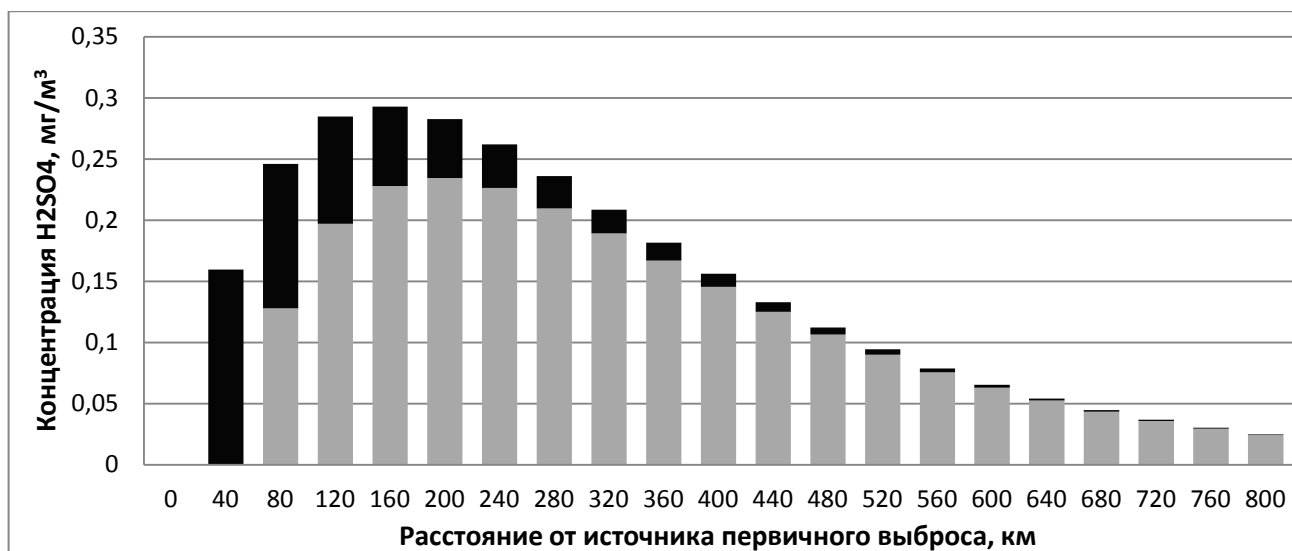


Рисунок 12 – Распределение вторичного выброса H_2SO_4 в зависимости от расстояния до источника первичного выброса при скорости ветра 1 м/спо данным ОАО «ММК» за 2013 год

Следует отметить, что полученные расчетные данные демонстрируют немонотонную зависимость концентраций вторичных выбросов от расстояний. Это означает, что повышенная концентрация опасных летучих веществ возможна не только вблизи промышленных центров, где расположены предприятия, имеющие большую производительность (металлургические комбинаты), а значит и большое количество первичных газовых выбросов, но и вдали от них, в местах,

где появления вредных газовых компонентов представляются случайностью. Возможно, часто упоминающиеся кислотные дожди могут быть последствиями такого немонотонного распространения вторичных газовых выбросов.

Достаточно долгое время жизни кислоты в атмосферном воздухе и постоянный распределенный ее источник являются причинами накопления кислоты в воздухе. Концентрация вторичного выброса меняется от точки к точке и в определенный момент времени достигает максимума. На рисунке 13 показано, что при увеличении скорости ветра максимум будет смещаться (удаляться) от источника первичного выброса. Значение концентрации H_2SO_4 в точке максимума с изменением скорости ветра так же будет меняться. Из графика видно, что при распространении кислоты наибольшей опасностью для населения, проживающего на расстояниях нескольких сотен километров от ОАО «ММК», являются погодные условия с незначительной средней скоростью ветра. Однако для населения, проживающего на больших расстояниях, опасность представляют как раз большие скорости ветра.

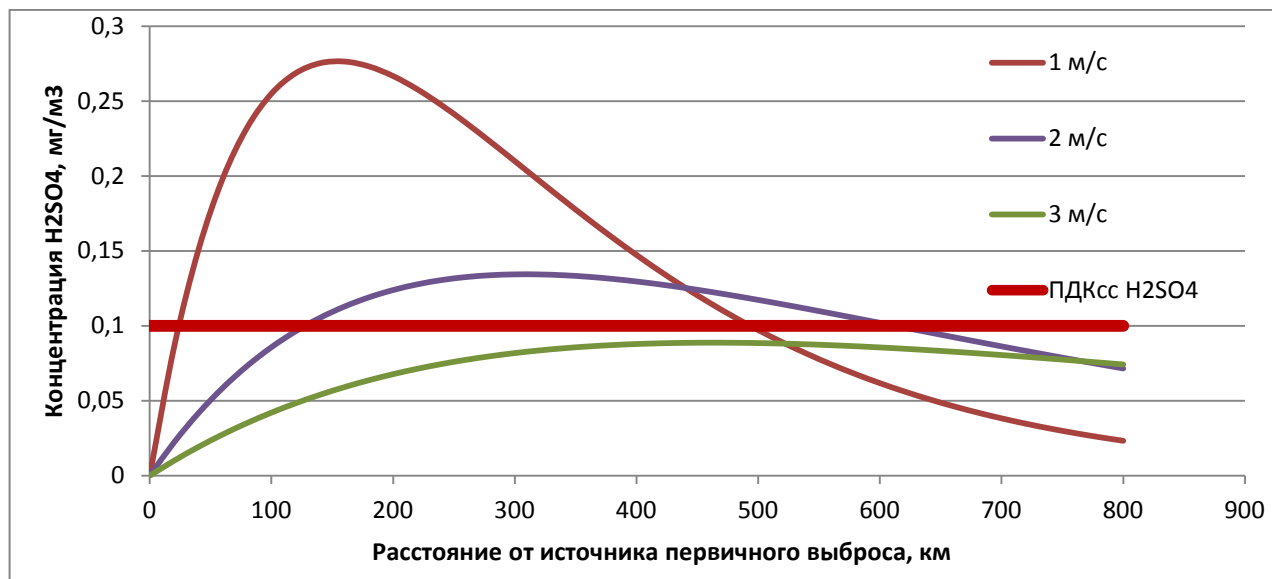


Рисунок 13 – Распределение вторичного выброса H_2SO_4 в зависимости от расстояния от источника первичного выброса при скоростях ветра 1, 2, 3 м/с по данным ОАО «ММК» за 2013 год

Так как изменение величины и положения максимума наблюдается при изменении скорости ветра, при этом для конкретного вещества (в нашем случае H_2SO_4) и предприятия остальные параметры, такие как количество выбросов, химическая активность и др., остаются неизменными, то можно рассчитать зависимость величины и расположения максимума от скорости ветра. Для ОАО «ММК» расстояние от источника до максимума концентрации составит $s \simeq 154000v$, м. Максимум концентрации H_2SO_4 при заданной мощности выброса составит $C_{Bmax} = 0,262/v$, мг/м³. Можно выразить значение концентрации в максимуме через m_A , тогда будем иметь: $C_{Bmax} = 5,29 * 10^{-7} m_A/v$, мг/м³. Последнюю формулу удобно использовать при изменении мощности выброса, например, при аварийном залповом выбросе SO_2 . Расчет может быть проведен оперативно, результаты расчета покажут максимально возможный риск превышения допустимой концентрации и установят место и время его появления.

Анализ распределения концентраций вторичных газовых выбросов может быть осуществлен вдоль любого из географических направлений региона расположения металлургического предприятия. Действительно, роза ветров для каждой местности содержит средние скорости ветра на любой заданный интервал времени в течение года для каждого из восьми радиус-векторов, соответствующих сторонам света. Таким образом, при известной мощности первичного выброса с помощью информации, имеющейся в розе ветров, предлагаемая модель позволяет построить полное стационарное пространственное поле распределения концентраций вторичного выброса во внешней зоне влияния металлургического предприятия.

4 Кинетическая модель определения стационарного поля концентраций вторичных загрязнителей

4.1 Основы кинетики для стационарного поля распределения

Предложенный численный способ прогноза пространственного распределения вторичного вещества очень удобен для получения общего вида поля концентраций. Вместе с тем для исследования особенностей функции пространственного распределения вторичного вещества более удобен был бы аналитический, а не численный вид этой функции. Для определения возможностей представления решения модели пространственного источника в аналитическом виде в работе предпринята попытка рассмотрения задачи методами химической кинетики. Кинетический способ исследования в данном случае осложнен тем обстоятельством, что его результатом должно стать стационарное концентрационное поле вторичного вещества, т.е. функция распределения должна оставаться неизменной во времени. Вследствие этого для описания процесса превращения первичного вещества во вторичное необходимо рассмотрение открытой системы. Поэтому условия задачи формулировались следующим образом:

Приток первичного вещества A в реакционную среду постоянен, что связано с непрерывным производственным циклом предприятия, поэтому концентрация A при выходе с предприятия $C_A^0 = \text{const}$. Вещество вторичного выброса B образуется в реакции превращения $A + D \rightarrow B$. D — вещество, присутствующее в атмосфере в избыточном количестве (так для процесса образования H_2SO_4 этим веществом является H_2O ; поскольку реакция образования H_2SO_4 происходит в открытом воздушном пространстве, воды всегда достаточно для образования вторичной серной кислоты). Константа скорости реакции образования B — k_1 . Вещество B распадается в пространстве, эффективная константа скорости процесса распада B — k_2 . A переходит в B в процессе движения вдоль направления x с постоянной скоростью v . Каждому положению x

— равному расстоянию от предприятия, можно сопоставить некоторое время $t^*(x) = x/v$, равное длительности пребывания вещества во внешней среде, т.е. длительности превращения первичного вещества, прошедшего данное расстояние, в вещество В.

В каждый момент t^* , т.е. при каждом значении x , $C_B = \frac{M_B}{M_A}(C_A^0 - C_A)$ как следствие закона сохранения вещества ($C_B^0 = 0$). Это происходит, поскольку распределение концентраций первичного и вторичного веществ вдоль оси x при постоянных внешних условиях является стационарным, изменений профилей концентраций со временем не происходит. Значит, изменения концентраций в каждой точке направления x равны нулю. Однако степень выхода реакции перехода А в В зависит от того, сколько времени вещество А находится в пути, т.е. от $t^* = x/v$. Весь процесс превращения А в В и параллельного распада В по мере удаления от источника выбросов можно представить с помощью двустадийной кинетической модели.

4.2 Кинетическая модель образования и распространения вторичных загрязнителей

Первая стадия: реакция $A + D \rightarrow B$, кинетическое уравнение которой можно представить в виде $w_A = -\frac{dC_A}{dt^*} = k_1 C_A$ или $-v \frac{dC_A}{dx} = k_1 C_A$.

Решением этого уравнения является выражение $C_A = C_A^0 e^{-\frac{k_1}{v}x}$.

На первой стадии идет образование В со скоростью

$$w_{B+} = \frac{dC_B}{dt^*} = k_1 C_B \rightarrow v \frac{dC_B}{dx} = \frac{M_B}{M_A} k_1 C_A = k_1 \frac{M_B}{M_A} C_A^0 e^{-\frac{k_1}{v}x}. \quad (25)$$

Для того, чтобы определить полную скорость изменения концентрации В с изменением расстояния x , необходимо рассмотреть вторую стадию процесса:

реакцию «гибели» В (В покидает реакционную систему – « $B \rightarrow$ »), кинетическое уравнение которой имеет вид:

$$w_{B-} = -\frac{dC_B}{dt^*} = k_2 C_B \rightarrow \frac{dC_B}{dx} = -\frac{k_2}{v} C_B. \quad (26)$$

Суммируя уравнения (25) и (26), получаем полную скорость изменения концентрации В при увеличении расстояния x :

$$\frac{dC_B}{dx} = \frac{k_1}{v} \frac{M_B}{M_A} C_A^0 e^{-\frac{k_1}{v}x} - \frac{k_2}{v} C_B. \quad (27)$$

Решая уравнение (27), получим

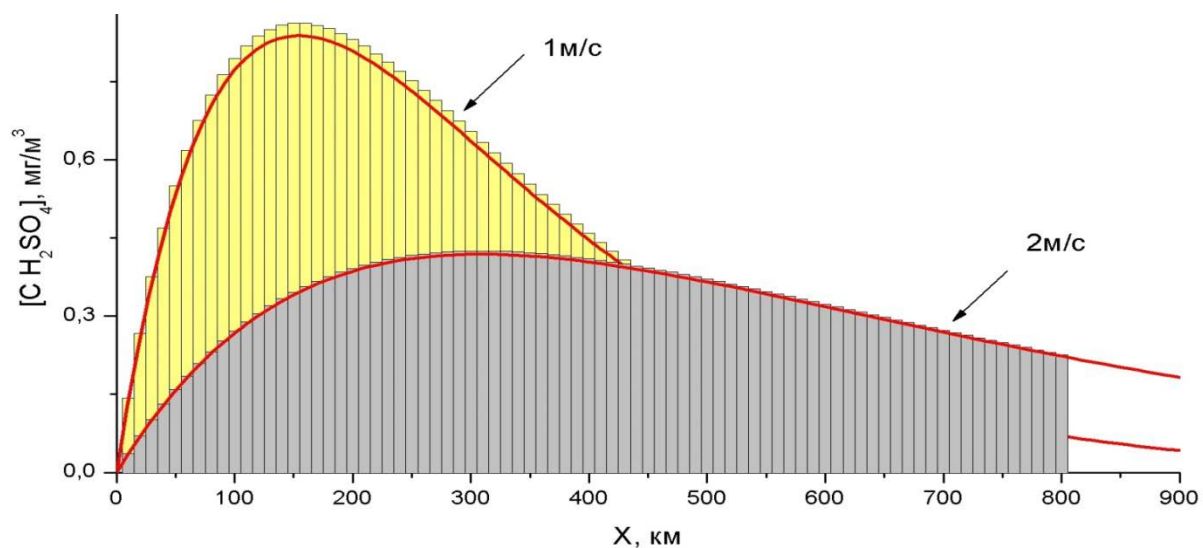
$$C_B = C_A^0 \frac{M_B}{M_A} \frac{k_1}{k_2 - k_1} \left(e^{-\frac{k_1}{v}x} - e^{-\frac{k_2}{v}x} \right). \quad (28)$$

4.3 Сравнение с численным расчетом

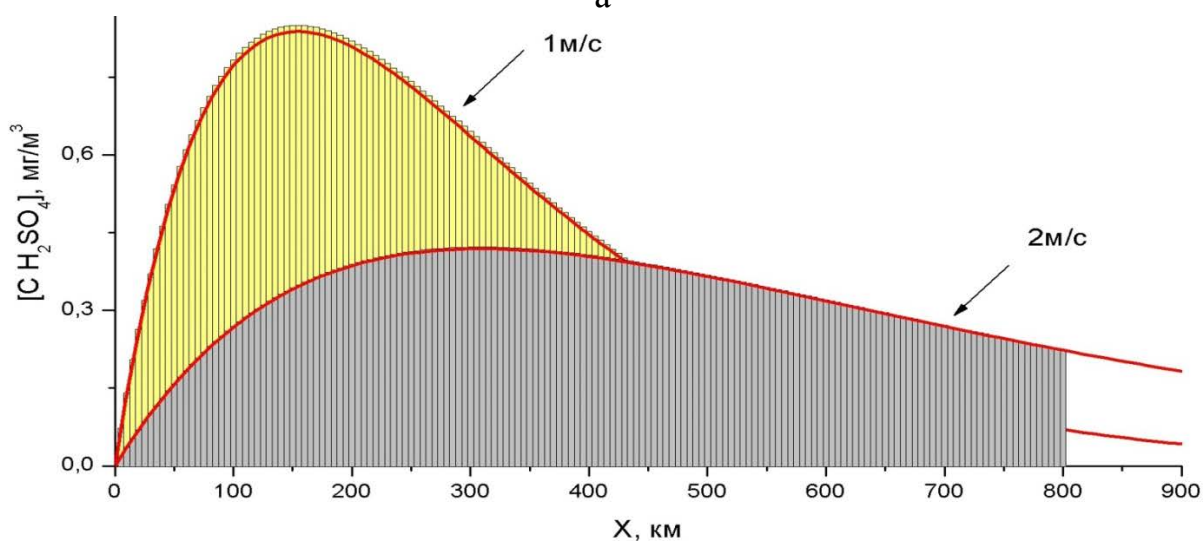
Для подтверждения адекватности кинетической модели были сопоставлены результаты расчетов, полученных численным (первым) и аналитическим (вторым) методами для одинаковых условий задачи. Расчет обоими способами проводился для предприятия ПАО "Северсталь" с использованием данных о газовых выбросах первичного вещества SO_2 за 2013 год [106]. Значения константы скорости образования вторичного вещества – H_2SO_4 - k_1 и константы «гибели» вторичного вещества - k_2 брались равными обобщенным константам, полученным из данных мониторинга европейского континента [64]. Расчет осуществлялся для двух различных скоростей ветра – 1 м/с и 2 м/с.

При сравнении результатов расчета следовало иметь в виду, что аналитический вариант дает единственную окончательную функцию распределения вторичного вещества для каждого значения скорости ветра. Вместе с тем, при расчете численным способом результат должен уточняться при

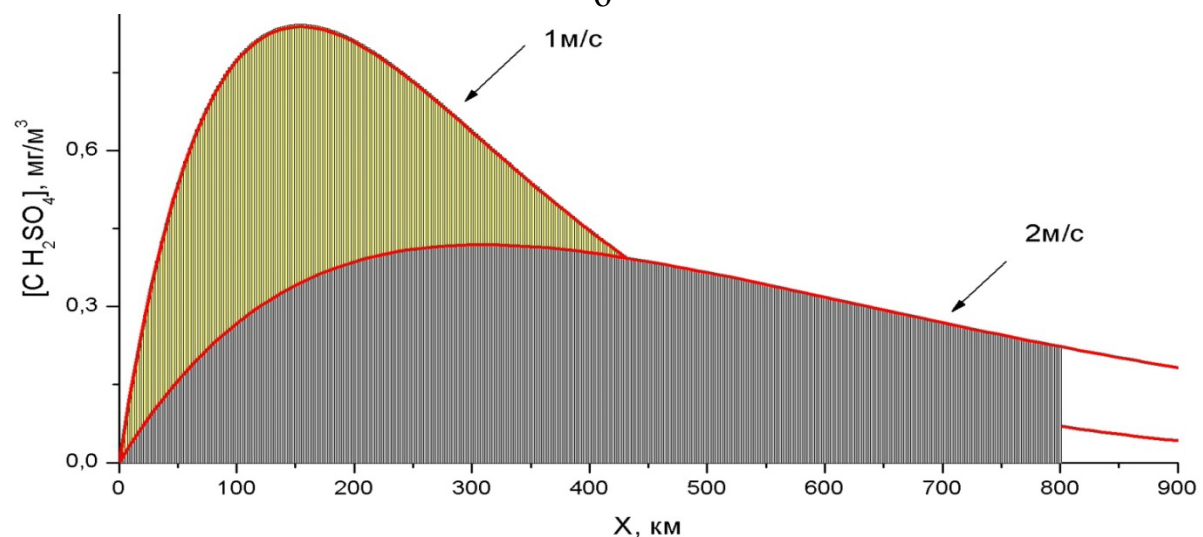
уменьшении шага итераций – величины Δx . Поэтому результаты аналитического расчета сравнивались с результатами численного метода, полученными при различных величинах Δx от шага размером 10 км (рисунок 14 а) до шага размером 2 км (рисунок 14 в). Видно, что чем меньше Δx , тем ближе друг к другу расположены кривые для обеих скоростей ветра. При наименьшем шаге итераций отличий в профилях концентраций обнаружить практически невозможно. Это означает, что обе предложенные модели – численная и аналитическая – дают одинаковые результаты, и каждая из них может использоваться для построения полей концентраций веществ вторичных выбросов во внешней зоне влияния крупных промышленных предприятий.



а



б



в

Рисунок 14 – Профили концентрации H_2SO_4 , численным методом с шагом 10, 5 и 2 км (рисунки а, б и в соответственно) и с помощью кинетической модели (красная линия) для ПАО Северсталь по данным 2013г.

4.4 Критические параметры, числа

Зависимость (28) — это немонотонная зависимость, имеющая максимум с координатами, определенными из условия $\frac{dC_B}{dx} = 0$:

$$x_{max} = \frac{(\ln k_1 - \ln k_2)v}{k_1 - k_2}, \quad (29)$$

$$C_{Bmax} = C_A^0 \frac{M_B}{M_A} \left(\frac{k_2}{k_1}\right)^{\frac{k_2}{k_1 - k_2}}. \quad (30)$$

Выражение (29) показывает, что $\frac{x_{max}}{v} = \frac{\ln k_1 - \ln k_2}{k_1 - k_2} = const$ является постоянной величиной для данной пары веществ первичного и вторичного загрязнителей. То есть при изменении скорости ветра от v_1 до v_2 положение максимума сдвигается на величину пропорционально отношению v_1/v_2 , т.к. $\frac{x_{max1}}{x_{max2}} = \frac{v_1}{v_2}$.

Как следует из формулы (30) при увеличении v все концентрации при одних и тех же расстояниях x снижаются, т.к. C_A^0 меняется пропорционально $1/v$. Снижение $\frac{C_{B1}}{C_{B2}} = \frac{v_2}{v_1}$, скажем, в 2 раза при увеличении v в два раза происходит на расстоянии $x_2 = 2x_1$. Так как положение максимума также смещается во столько же раз, то значение концентрации C_{Bmax} уменьшается также в отношение $\frac{v_2}{v_1}$.

5 Расчет полей концентраций для конкретных предприятий

В главе 3 был проведен пробный расчет поля концентраций вторичных выбросов H_2SO_4 и HNO_3 , используя в качестве исходных данных поля концентраций первичных выбросов серосодержащего компонента SO_2 и азотосодержащего NO_x . В качестве примера были использованы реальные среднегодовые выбросы ОАО «ММК». Картина распределения вторичных H_2SO_4 и HNO_3 определялась в зависимости от скорости ветра в диапазоне значений от 1 до 5 м/с.

Проведем конкретный расчет распределения вторичных выбросов H_2SO_4 и HNO_3 для трех металлургических предприятий полного цикла с учетом действительной помесечной розой ветров географического региона расположения предприятия.

5.1 Распределение вторичных загрязнителей предприятия НЛМК

По данным НЛМК [107], объем выбросов за 2008 год NO_x и SO_2 составил 8,84 и 17,83 тысяч тонн, соответственно. Площадь выноса, то есть диаметр предприятия умноженный на высоту трубы 100 метров, составляет в среднем 597230 м². Среднемесячная скорость ветра и повторяемость по направлениям приведены в таблицах 21 и 22 [103].

Таблица 21 – Среднемесячная скорость ветра для г. Липецк

Направление ветра	Месяц											
	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12
с	3,7	3,6	3,4	3,4	3,1	3	2,8	2,8	2,9	3	3,3	3,6
с-в	3,6	3,5	3,3	3,2	2,8	2,9	2,8	2,7	2,9	2,9	3,1	3,4
в	4	3,9	3,9	3,8	3,4	3,2	3	3,2	3,1	3,6	3,6	3,9
ю-в	4	4,1	3,7	3,9	3,6	3,6	3,1	3	3,3	3,8	3,6	3,6
ю	3,6	3,8	3,6	3,4	3,3	2,8	2,6	2,6	2,8	3,3	3,3	3,6
ю-з	3,5	3,4	3,4	3,2	3,1	2,8	2,7	2,5	2,8	3,5	3,6	3,7
з	3	3,2	3,2	3,1	2,7	2,4	2,3	2,3	2,5	2,5	3,4	3,1
с-з	3,7	4,1	3,7	3,4	3,3	2,7	2,9	2,7	3,1	3,2	3,8	3,7

Таблица 22 – Повторяемость направлений ветра для г. Липецк

Направление ветра	Месяц											
	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12
с	14,8	13,4	13,9	15,7	13,8	10,2	9,1	8,9	12,1	14,8	16,7	17,8
с-в	14,3	10,2	10,1	8	7,9	7,8	6,3	7,4	9,4	11,4	12,8	12,4
в	24,3	21,9	20,8	15,7	17	21,2	21,4	21,5	25,2	25,6	23	22,8
ю-в	9	9,1	7,1	8,2	10,2	12,8	14,7	12	12	10,9	8,3	8,9
ю	9,8	9,7	9,7	12,3	14,8	18,4	20,4	19,9	14,4	11,4	9,1	8,4
ю-з	6,1	7,1	7,7	10,1	10,9	10	11,1	11,7	9,3	6,5	8	4,9
з	9,8	13,7	16,1	15,8	12,2	10	8,8	10,1	7,9	7,1	8,8	10,9
с-з	11,8	14,9	14,7	14,4	13,3	9,5	8,1	8,4	9,8	12,4	13,3	13,8

5.1.1 Распределение азотной кислоты

Для каждого месяца и направления рассчитаем расстояния, на которых концентрация вторичного выброса достигнет максимума при учете, что ветер будет со средней скоростью в одном направлении в течение некоторого времени (нескольких часов). В таблицах 23 и 24 приведены данные, рассчитанные для вторичного выброса HNO_3 .

Таблица 23 – Расстояние в км, на котором концентрация вторичного выброса HNO_3 достигает максимума при средней скорости ветра по данным НЛМК за 2008 год

Направление ветра	Месяц											
	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12
с	216	210	198	198	181	175	163	163	169	175	193	210
с-в	210	204	193	187	163	169	163	158	169	169	181	198
в	234	228	228	222	198	187	175	187	181	210	210	228
ю-в	234	239	216	228	210	210	181	175	193	222	210	210
ю	210	222	210	198	193	163	152	152	163	193	193	210
ю-з	204	198	198	187	181	163	158	146	163	204	210	216
з	175	187	187	181	158	140	134	134	146	146	198	181
с-з	216	239	216	198	193	158	169	158	181	187	222	216

Таблица 24 – Значение максимальной концентрации вторичного выброса HNO_3 по данным НЛМК за 2008 год, мг/м^3

Направление ветра	Месяц											
	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12
с	0,13	0,13	0,14	0,14	0,15	0,15	0,17	0,17	0,16	0,15	0,14	0,13
с-в	0,13	0,13	0,14	0,15	0,17	0,16	0,17	0,17	0,16	0,16	0,15	0,14
в	0,12	0,12	0,12	0,12	0,14	0,15	0,15	0,15	0,15	0,13	0,13	0,12
ю-в	0,12	0,11	0,13	0,12	0,13	0,13	0,15	0,15	0,14	0,12	0,13	0,13
ю	0,13	0,12	0,13	0,14	0,14	0,17	0,18	0,18	0,17	0,14	0,14	0,13
ю-з	0,13	0,14	0,14	0,15	0,15	0,17	0,17	0,19	0,17	0,13	0,13	0,13
з	0,15	0,15	0,15	0,15	0,17	0,19	0,20	0,20	0,19	0,19	0,14	0,15
с-з	0,13	0,11	0,13	0,14	0,14	0,17	0,16	0,17	0,15	0,15	0,12	0,13

Для наглядности полученного результата построим карты-схемы с нанесением изоконцентрационных линий в местах максимальных концентраций для двух месяцев, ноября и августа (рисунки 15-16). Цифрами обозначены значения концентраций в данных точках в мг/м^3 .

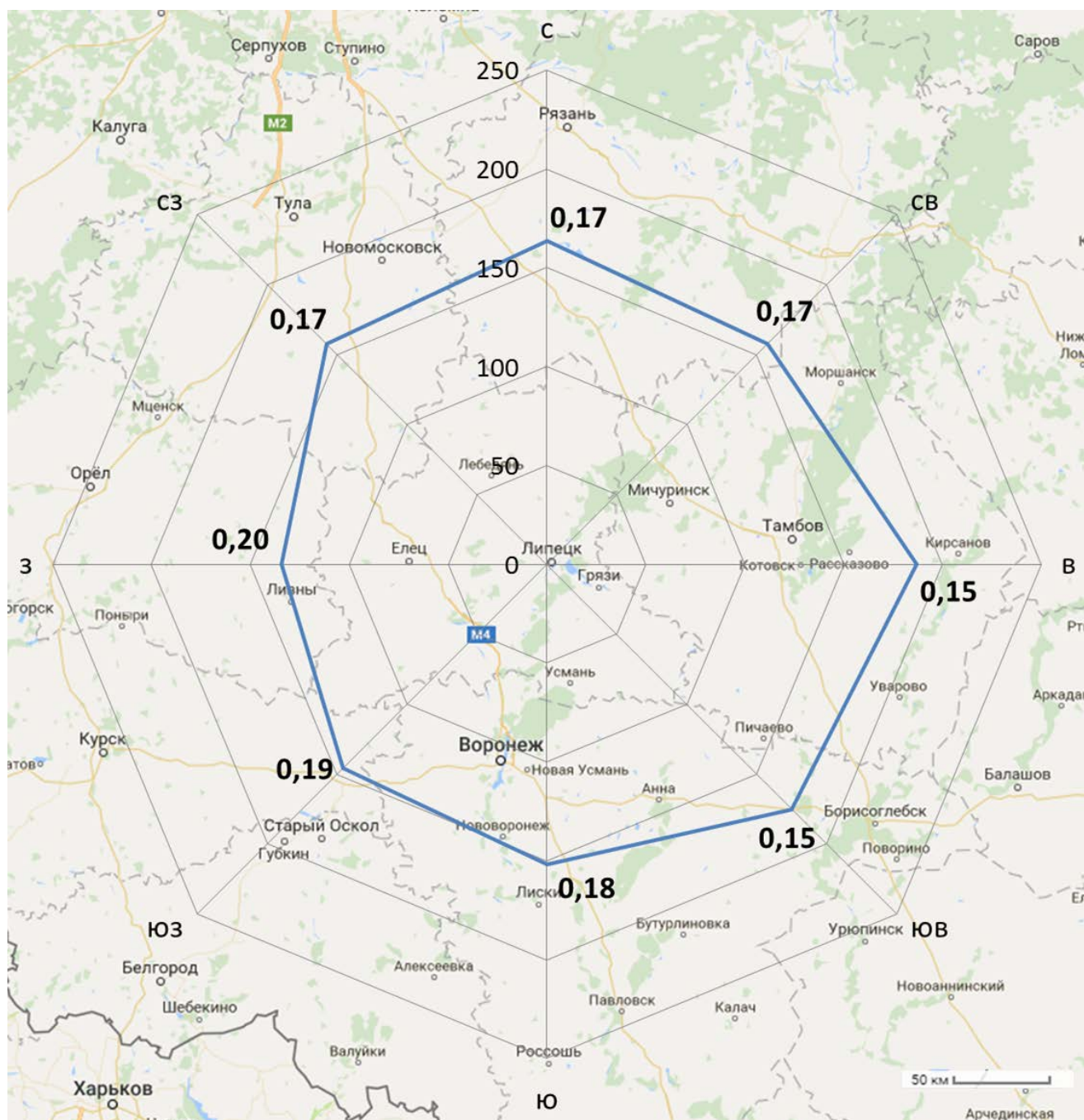


Рисунок 15 – Карта-схема изоконцентрационных линий вторичного выброса HNO_3 , где значения концентрации достигают максимума при средней скорости ветра **августа** по данным НЛМК за 2008 год, цифрами обозначены значения концентраций в мг/м^3 , линией обозначено расстояние от источника до точки максимума

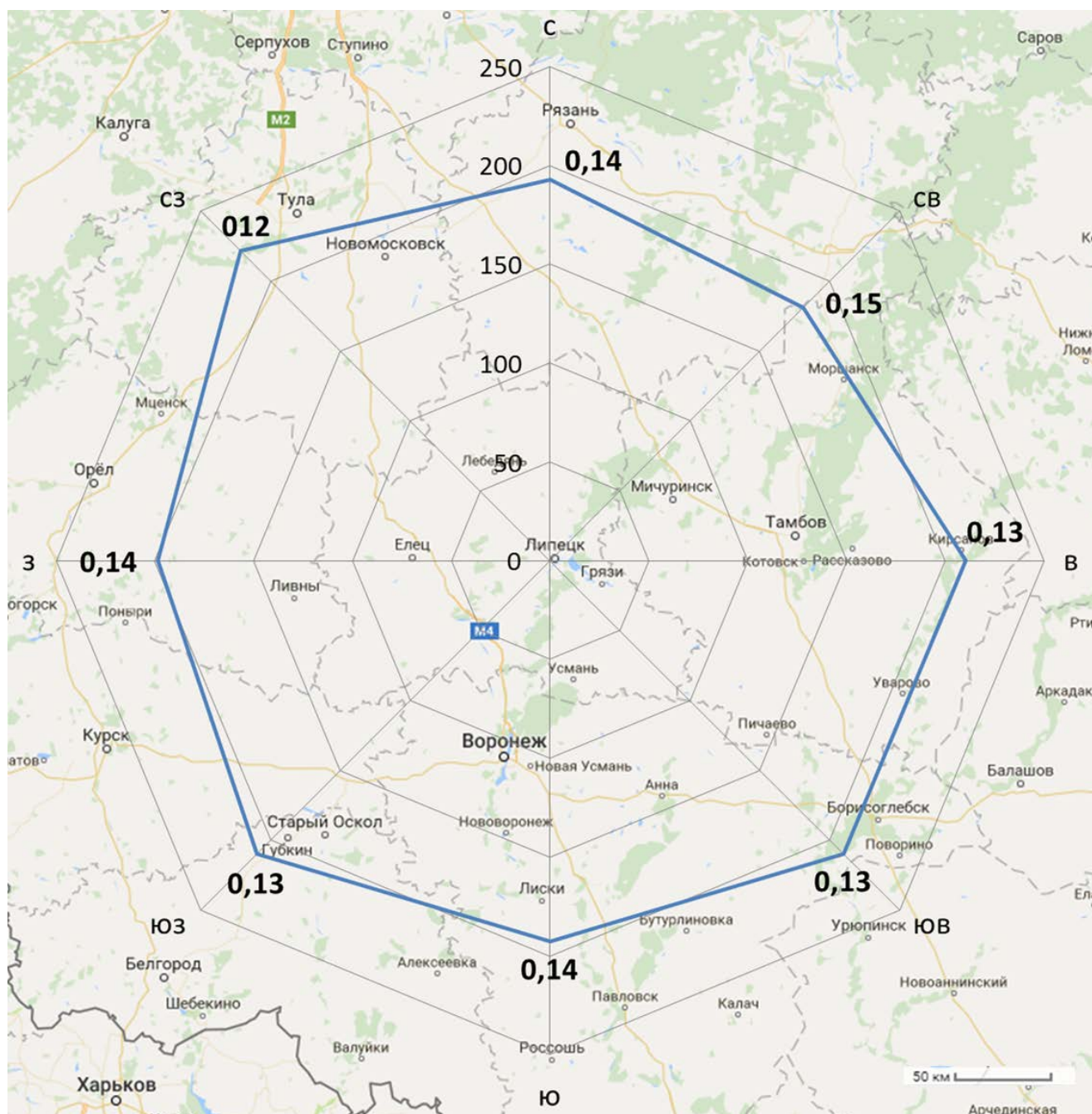


Рисунок 16 – Карта-схема изоконцентрационных линий вторичного выброса HNO_3 , где значения концентрации достигают максимума при средней скорости ветра **ноября** по данным НЛМК за 2008 год, цифрами обозначены значения концентраций в мг/м^3 , линией обозначено расстояние от источника до точки максимума

Предельно допустимая среднесуточная концентрация азотной кислоты в атмосферном воздухе составляет $0,15 \text{ мг/м}^3$. На карте-схеме, построенной для

ноября нет превышения ПДКс.с. Это говорит о том, что в ноябре при устойчивых метеоусловиях, соответствующих средним показателям, азотосодержащие выбросы НЛМК не представляют угрозы для населения, проживающего в Липецкой области и соседних регионах. Этого, к сожалению, нельзя сказать об августе. В этом месяце при устойчивых метеоусловиях, соответствующих средним показателям, превышение ПДКс.с. происходит практически по всем направлениям. Однако здесь следует обратить внимание на вероятность установления высоких концентраций по каждому из направлений или, другими словами, на вероятность того, что ветер будет направлен именно в данном направлении. Для этого обратимся к таблице 22. Например в южном направлении вероятность превышения ПДКс.с. составляет почти 20%. При этом в серном, северо-восточном и северо-западном направлении вероятность превышения ПДК менее 10%.

Для того чтобы проанализировать как меняется концентрация HNO_3 на всем пути распространения вторичного выброса и определить точнее расстояния, на которых возможно превышение ПДК, можно построить профиль концентрации для заданной скорости ветра. Этот анализ можно провести одновременно для нескольких скоростей ветра, выбрав месяц или одно направление, которые нас интересуют. Для примера из таблицы 21 возьмем несколько значений скоростей ветра северо-западного направления: средняя скорость февраля 4,1 м/с, апреля 3,4 м/с и июня 2,7 м/с. Полученные профили концентраций представлены на рисунке 17.

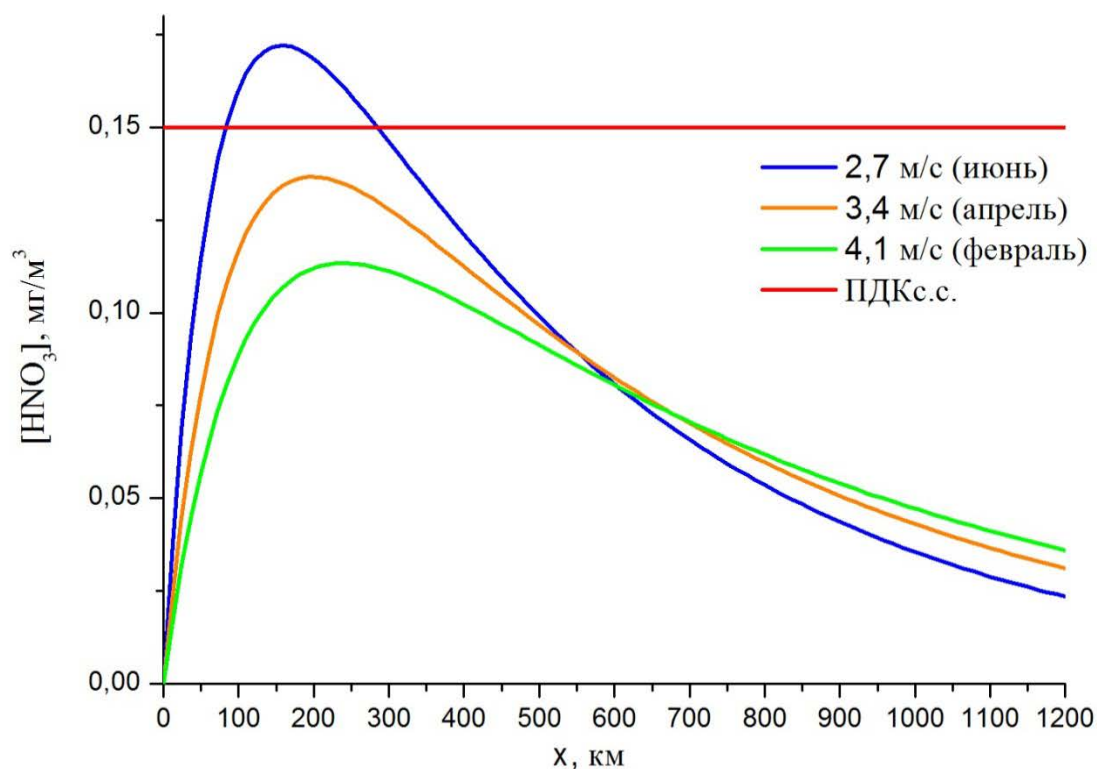


Рисунок 17 – Профили концентраций HNO_3 для трех скоростей ветра северо-западного направления, рассчитанные по данным НЛМК за 2008 год

По рисунку 17 видно, что при средних устойчивых метеоусловиях в северо-западном направлении в апреле и феврале не наблюдается превышение ПДКс.с.. В июне в интервале расстояний от 80 до 280 км от НЛМК возможно превышение ПДКс.с. с вероятностью 9,5%.

5.1.2 Распределение серной кислоты

Проведем аналогичные расчеты для вторичного выброса H_2SO_4 . Значения максимумов концентрации и расстояний, на которых этот максимум появляется, приведены в таблицах 25 и 26.

Таблица 25 – Расстояние в км, на котором концентрация вторичного выброса H_2SO_4 достигает максимума при средней скорости ветра по данным НЛМК за 2008 год

Направление ветра	Месяц											
	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12
с	571	556	525	525	478	463	432	432	448	463	509	556
с-в	556	540	509	494	432	448	432	417	448	448	478	525
в	617	602	602	586	525	494	463	494	478	556	556	602
ю-в	617	633	571	602	556	556	478	463	509	586	556	556
ю	556	586	556	525	509	432	401	401	432	509	509	556
ю-з	540	525	525	494	478	432	417	386	432	540	556	571
з	463	494	494	478	417	370	355	355	386	386	525	478
с-з	571	633	571	525	509	417	448	417	478	494	586	571

Таблица 26 – Значение максимальной концентрации вторичного выброса H_2SO_4 по данным НЛМК за 2008 год, мг/м^3

Направление ветра	Месяц											
	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12
с	0,17	0,17	0,18	0,18	0,20	0,20	0,22	0,22	0,21	0,20	0,19	0,17
с-в	0,17	0,18	0,19	0,19	0,22	0,21	0,22	0,23	0,21	0,21	0,20	0,18
в	0,15	0,16	0,16	0,16	0,18	0,19	0,20	0,19	0,20	0,17	0,17	0,16
ю-в	0,15	0,15	0,17	0,16	0,17	0,17	0,20	0,20	0,19	0,16	0,17	0,17
ю	0,17	0,16	0,17	0,18	0,19	0,22	0,24	0,24	0,22	0,19	0,19	0,17
ю-з	0,18	0,18	0,18	0,19	0,20	0,22	0,23	0,25	0,22	0,18	0,17	0,17
з	0,20	0,19	0,19	0,20	0,23	0,26	0,27	0,27	0,25	0,25	0,18	0,20
с-з	0,17	0,15	0,17	0,18	0,19	0,23	0,21	0,23	0,20	0,19	0,16	0,17

Построим карты-схемы с нанесением изоконцентрационных линий в местах максимальных концентраций для двух месяцев, февраля и июня (рисунки 18-19). Цифрами обозначены значения концентраций в данных точках в мг/м^3 .

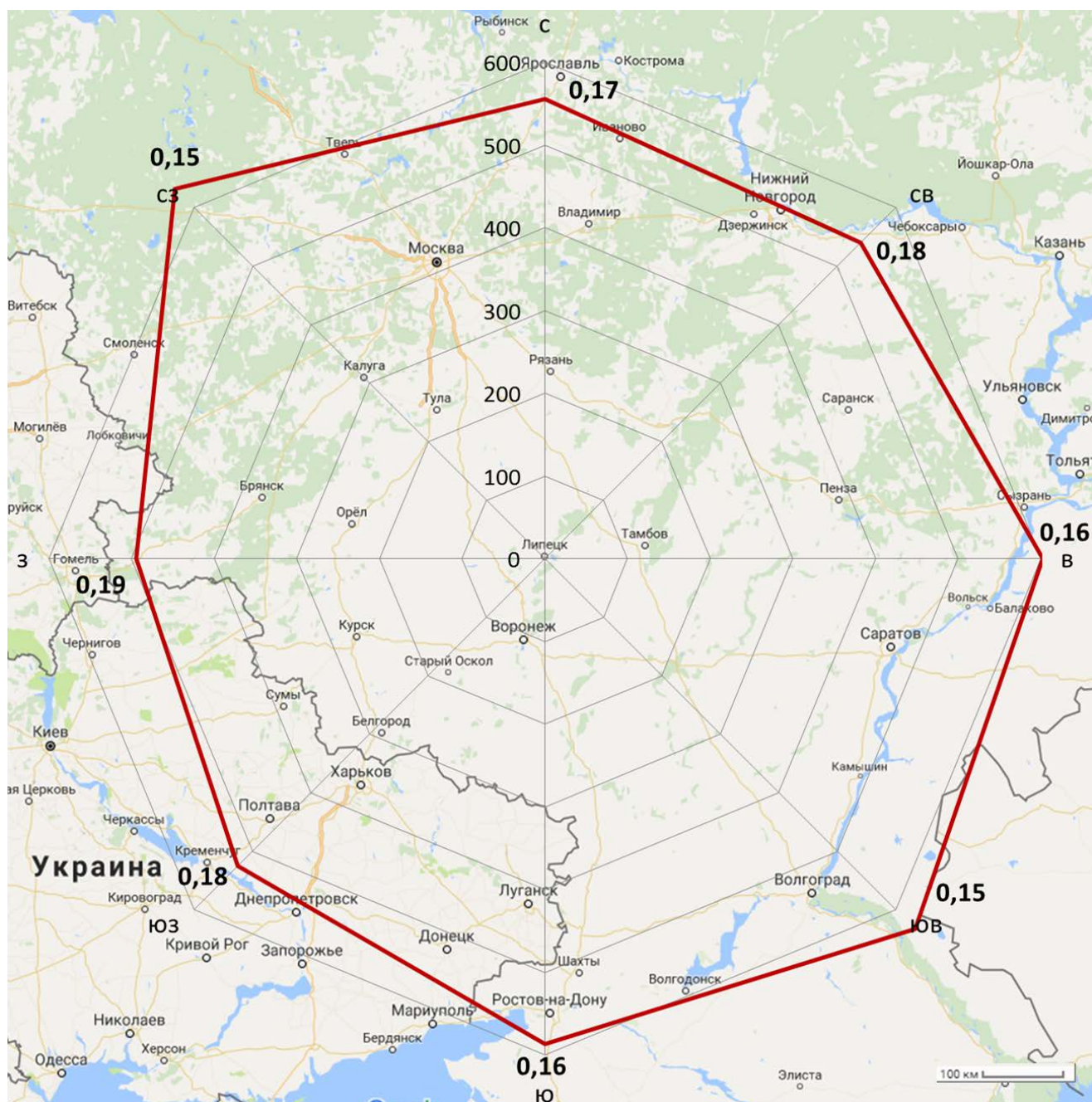


Рисунок 18 – Карта-схема изоконцентрационных линий вторичного выброса H_2SO_4 , где значения концентрации достигают максимума при средней скорости ветра **февраля** по данным НЛМК за 2008 год, цифрами обозначены значения концентраций в мг/м^3 , линией обозначено расстояние от источника до точки максимума

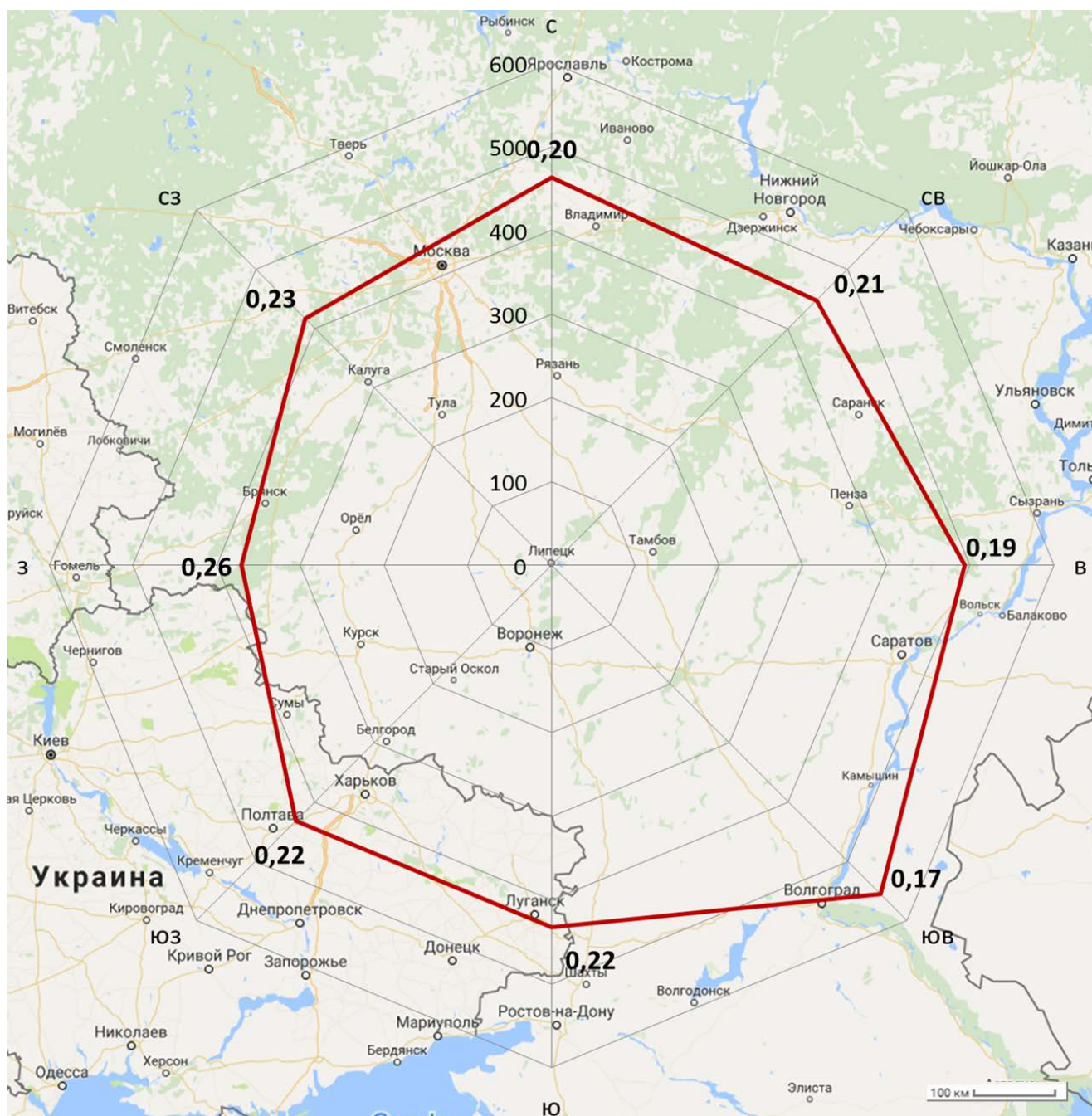


Рисунок 19 – Карта-схема изоконцентрационных линий вторичного выброса H_2SO_4 , где значения концентрации достигают максимума при средней скорости ветра **июня** по данным НЛМК за 2008 год, цифрами обозначены значения концентраций в мг/м^3 , линией обозначено расстояние от источника до точки максимума

Предельно допустимая среднесуточная концентрация серной кислоты в атмосферном воздухе составляет $0,1 \text{ мг/м}^3$. На картах-схемах, построенной для

обоих месяцев наблюдается превышение ПДКс.с., для февраля в меньшей степени, для июня в большей. На карте-схеме видно, что при устойчивых средних метеоусловиях серосодержащие выбросы НЛМК представляют угрозу для населения, проживающего не только в Липецкой и соседних областях, но и в Украине. Превышение ПДКс.с. происходит по всем направлениям. В феврале и июне наиболее опасным направлением является восток, здесь вероятность установления высоких концентраций, превышающих ПДКс.с., составляет 21,9% для февраля и 21,2% для июня. То есть при устойчивых средних метеоусловиях в течение 6 дней в обоих месяцах в восточном направлении возможно превышение ПДКс.с. Вероятность превышения предельной концентрации в феврале в юго-западном направлении составляет всего 7,1%, то есть 2 дня; в июне наиболее безопасным направлением является северо-восток, 7,8.

Для анализа изменения концентрация H_2SO_4 на всем пути распространения вторичного выброса построим профили концентраций для нескольких средних скоростей ветра южного направления: средняя скорость февраля 3,8 м/с, июля 2,6 м/с и октября 3,3 м/с. Полученные профили концентраций представлены на рисунке 20.

По рисунку 20 видно, что при средних устойчивых метеоусловиях в южном направлении превышение ПДКс.с. наблюдается в каждом месяце, феврале, июле и октябре. В июле в превышение ПДКс.с. возможно в интервале расстояний от 75 до 1190 км от НЛМК с вероятностью 20,4%, причем максимальная концентрация почти в 2,5 раза превышает предельно допустимую. В октябре интервал расстояний составляет от 130 до 1300 км, вероятность превышения концентрации 11,4%. В феврале: от 180 до 1370 км, причем максимальная концентрация только в 1,5 раза превышает ПДКс.с. с вероятностью 9,7%.

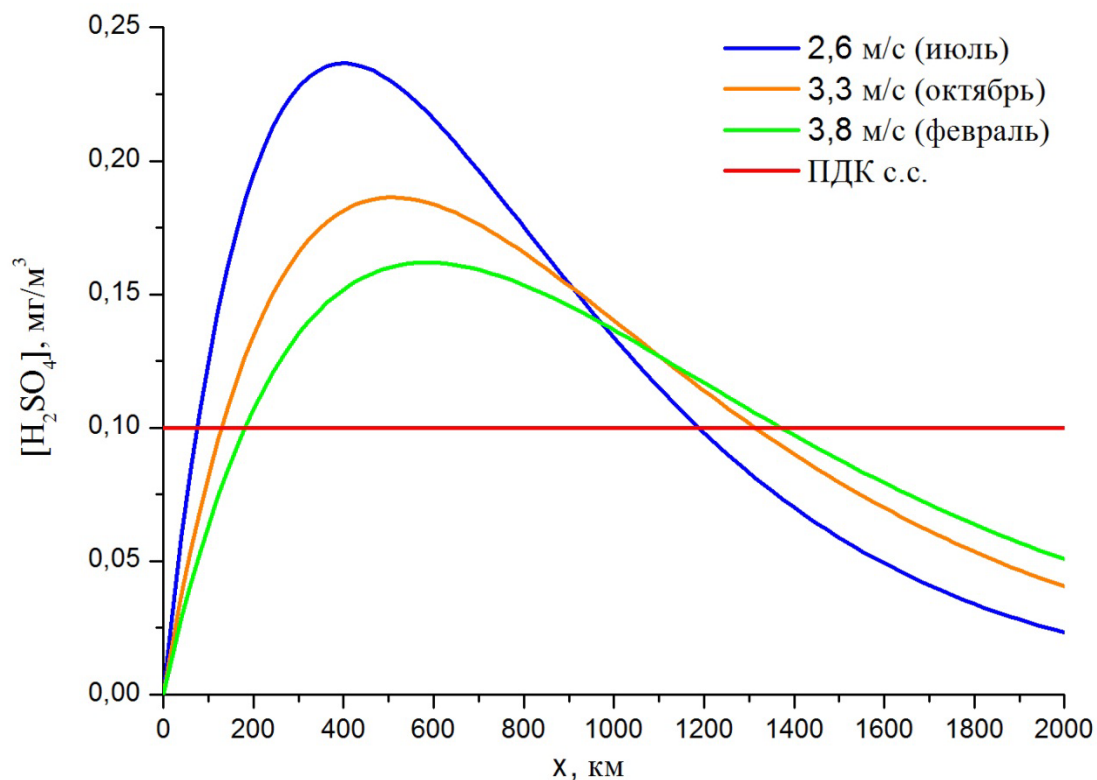


Рисунок 20 – Профили концентраций H_2SO_4 для трех скоростей ветра южного направления, рассчитанные по данным НЛМК за 2008 год

5.2 Распределение вторичных загрязнителей предприятия ЧерМК

Проведем аналогичный расчет распределения вторичных выбросов H_2SO_4 и HNO_3 для череповецкой площадки ПАО «Северсталь».

По данным ЧерМК [106], объем выбросов NO_x и SO_2 за 2014 год составил 11,91 и 26,65 тысяч тонн, соответственно. Площадь выноса, то есть диаметр предприятия умноженный на высоту трубы 100 метров, составляет в среднем 437130 м². Среднемесячная скорость ветра и повторяемость по направлениям приведены в таблицах 27 и 28 [103].

Таблица 27 – Среднемесячная скорость ветра для г.Череповец

Направление ветра	Месяц											
	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12
с	3,8	3,6	3,7	3,4	3,3	2,8	2,6	2,7	3	3,5	3,7	3,8
с-в	3,1	3	2,8	2,7	2,7	2,5	2,2	2,1	2,4	2,8	3	3,1
в	3,4	3,5	3,1	3,3	3,4	3	2,6	2,9	3	3,1	3,1	3,3
ю-в	4,1	3,9	3,8	3,9	4,2	3,8	3,4	3,4	3,5	4,1	4,1	4,2
ю	4,2	4,2	4,4	4,2	4,2	3,8	3,3	3,3	3,7	4,3	4,3	4,8
ю-з	4	3,9	3,8	4	3,9	3,4	3,3	3,4	3,7	4,2	3,9	4,2
з	2,9	3,3	3,3	3,1	3,4	2,8	2,7	2,8	3	2,8	3	3,1
с-з	3,4	3,6	3,5	3,1	3	2,7	2,6	2,6	2,9	3,2	3,4	3,4

Таблица 28 – Повторяемость направлений ветра для г.Череповец

Направление ветра	Месяц											
	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12
с	21,9	21,8	24,3	16,7	14,7	13,8	14,1	14,1	18,9	21,1	25,2	25,3
с-в	17	14,2	17,2	14,2	12,9	11,6	10,8	12,6	16	19,6	18,8	17,9
в	14,8	14,1	13,6	12,2	13,4	14,7	13,6	16,1	16,9	17,1	15,5	14,5
ю-в	12,2	13,5	12,2	14	15,7	16,2	16,6	14,3	12,5	12	9,6	10,7
ю	8	7,6	7,8	12,1	16,2	17	16	14,4	10,8	10,8	7,5	6,7
ю-з	2,6	3,3	2,5	6,2	7,2	7,5	6,8	7	5,9	3,1	3,4	2,7
з	7,5	7,7	6,4	10,4	9,3	8,5	9,4	9,3	6,8	4,2	6,4	7,9
с-з	15,9	17,9	16	14,2	10,5	10,7	12,8	12,2	12,2	12	13,6	14,2

5.2.1 Распределение азотной кислоты

Для каждого месяца и направления рассчитаем расстояния, на которых концентрация вторичного выброса достигнет максимума при учете, что ветер будет со средней скоростью в одном направлении в течение некоторого времени (нескольких часов). В таблицах 29 и 30 приведены данные, рассчитанные для вторичного выброса HNO_3 .

Таблица 29 – Расстояние в км, на котором концентрация вторичного выброса HNO_3 достигает максимума при средней скорости ветра по данным ЧерМК за 2014 год

Направление ветра	Месяц											
	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12
с	222	210	216	198	193	163	152	158	175	204	216	222
с-в	181	175	163	158	158	146	128	123	140	163	175	181
в	198	204	181	193	198	175	152	169	175	181	181	193
ю-в	239	228	222	228	245	222	198	198	204	239	239	245
ю	245	245	257	245	245	222	193	193	216	251	251	280
ю-з	234	228	222	234	228	198	193	198	216	245	228	245
з	169	193	193	181	198	163	158	163	175	163	175	181
с-з	198	210	204	181	175	158	152	152	169	187	198	198

Таблица 30 – Значение максимальной концентрации вторичного выброса HNO_3 по данным ЧерМК за 2014 год, мг/м^3

Направление ветра	Месяц											
	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12
с	0,23	0,24	0,23	0,25	0,26	0,31	0,33	0,32	0,29	0,24	0,23	0,23
с-в	0,28	0,29	0,31	0,32	0,32	0,34	0,39	0,41	0,36	0,31	0,29	0,28
в	0,25	0,24	0,28	0,26	0,25	0,29	0,33	0,29	0,29	0,28	0,28	0,26
ю-в	0,21	0,22	0,23	0,22	0,20	0,23	0,25	0,25	0,24	0,21	0,21	0,20
ю	0,20	0,20	0,19	0,20	0,20	0,23	0,26	0,26	0,23	0,20	0,20	0,18
ю-з	0,21	0,22	0,23	0,21	0,22	0,25	0,26	0,25	0,23	0,20	0,22	0,20
з	0,29	0,26	0,26	0,28	0,25	0,31	0,32	0,31	0,29	0,31	0,29	0,28
с-з	0,25	0,24	0,24	0,28	0,29	0,32	0,33	0,33	0,29	0,27	0,25	0,25

Построим карты-схемы с нанесением изоконцентрационных линий в местах максимальных концентраций для двух месяцев, января и июля (Рисунки 21-22). Цифрами обозначены значения концентраций в данных точках в мг/м^3 .

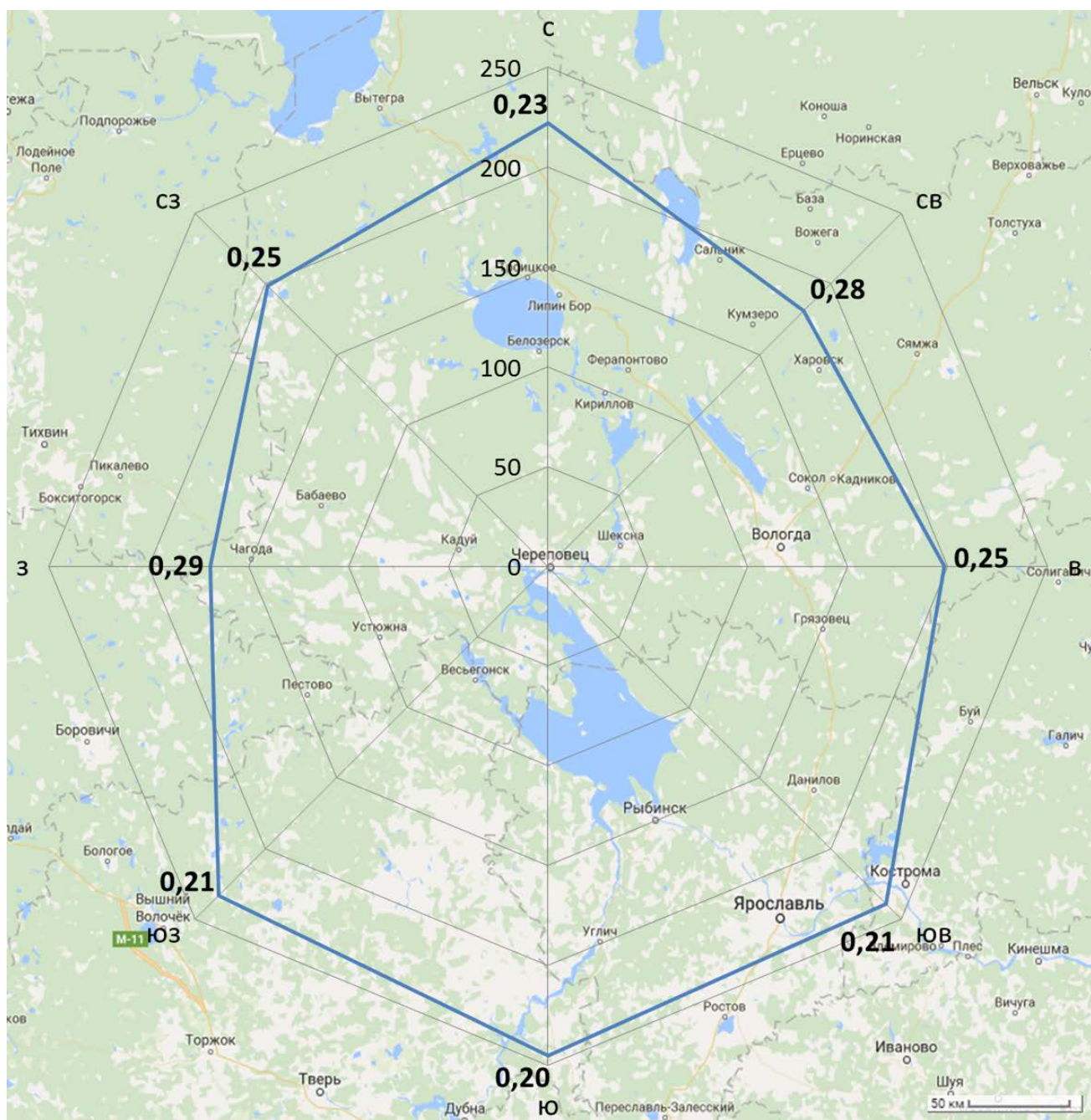


Рисунок 21 – Карта-схема изоконцентрационных линий вторичного выброса HNO_3 , где значения концентрации достигают максимума при средней скорости ветра **января** по данным ЧерМК за 2014 год, цифрами обозначены значения концентраций в мг/м^3 , линией обозначено расстояние от источника до точки максимума

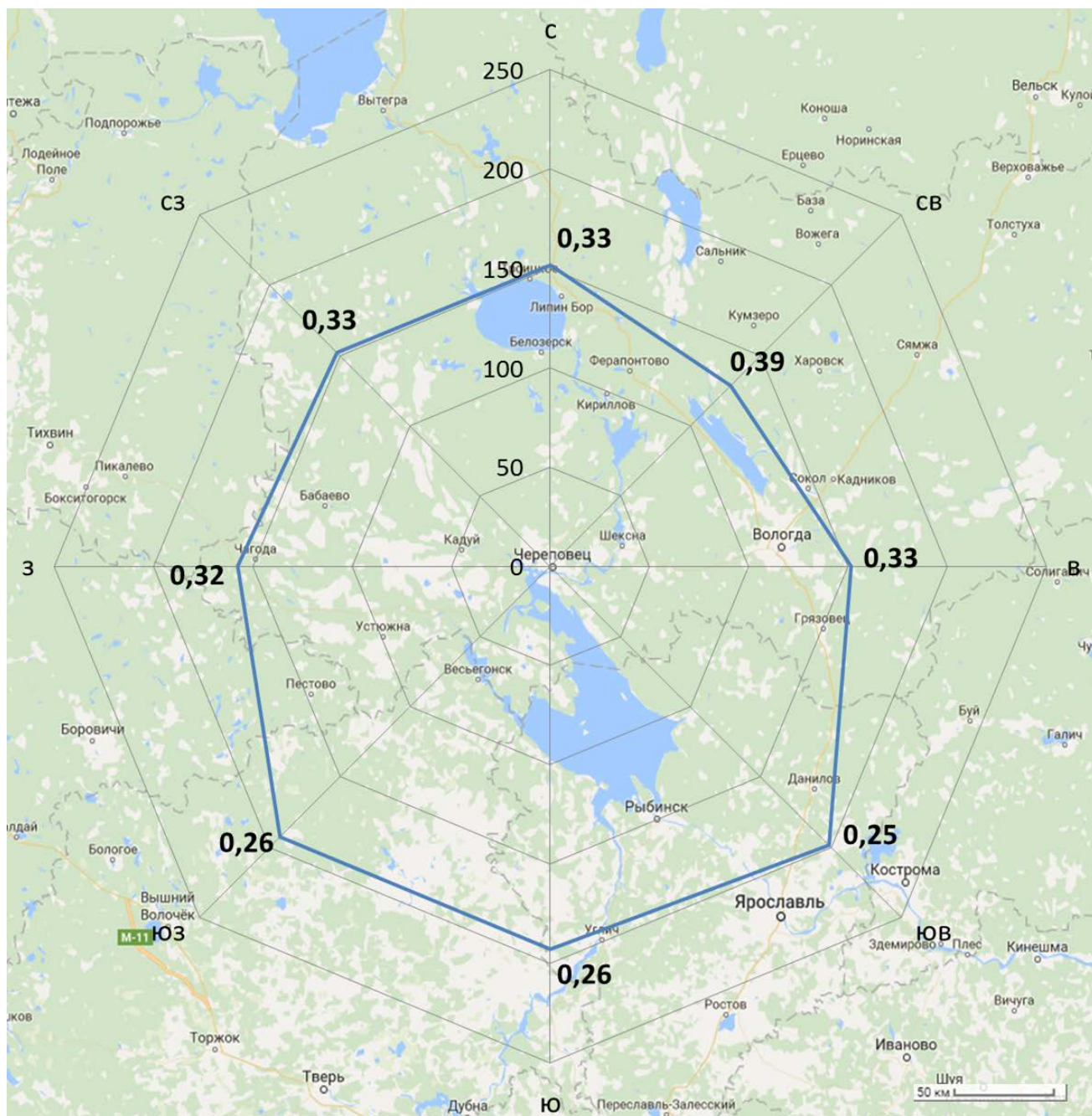


Рисунок 22 – Карта-схема изоконцентрационных линий вторичного выброса HNO_3 , где значения концентрации достигают максимума при средней скорости ветра июля по данным ЧерМК за 2014 год, цифрами обозначены значения концентраций в мг/м^3 , линией обозначено расстояние от источника до точки максимума

Превышение предельно допустимой среднесуточной концентрации азотной кислоты в атмосферном воздухе ($0,15 \text{ мг/м}^3$) на картах-схемах наблюдается для обоих месяцев, февраля и июля. При устойчивых средних метеоусловиях азотосодержащие выбросы ЧерМК представляют угрозу для населения, проживающего в регионе расположения предприятия и в соседних областях. Превышение ПДКс.с. происходит по всем направлениям. В январе наибольшей опасности подвержено население, проживающее к югу от ЧерМК, вероятность установления концентраций, превышающих ПДКс.с., в этом направлении составляет 21,9%, максимальный уровень концентрации в среднем может достигать $0,20 \text{ мг/м}^3$. При этом в западном направлении концентрация почти в 2 раза превышает ПДКс.с. и составляет $0,29 \text{ мг/м}^3$, вероятность достижения такой концентрации 14,8%, т.е. более четырех дней в месяце.

В июле наиболее опасно юго-восточное направление, вероятность превышения ПДКс.с. в 2,2 раза составляет 16,6%. А в северо-восточном направлении вероятность достижения концентрации серной кислоты в атмосферном воздухе $0,39 \text{ мг/м}^3$ (что в 2,6 раз превышает ПДКс.с.) составляет 6,8%.

Для анализа изменения концентрация HNO_3 на всем пути распространения вторичного выброса построим профили концентраций для нескольких средних скоростей ветра северного направления: средняя скорость января 3,8 м/с, мая 3,3 м/с и июля 2,6 м/с. Полученные профили концентраций представлены на рисунке 23.

На рисунке 23 видно, что при средних устойчивых метеоусловиях в северном направлении превышение ПДКс.с. наблюдается в каждом месяце, январе, мае и июле. Расстояния, на которых концентрации превышают ПДКс.с., примерно одинаковы для всех месяцев и составляют от 50 до 600 км от ЧерМК.

В северном направлении вероятность достижения концентрацией HNO_3 значения $0,33 \text{ мг/м}^3$ в июле составляет 14,1%. В мае вероятность достижения уровня концентрации $0,26 \text{ мг/м}^3$ составляет 14,7%. И наконец, вероятность достижения уровня концентрации $0,23 \text{ мг/м}^3$ в январе составляет 21,9%.

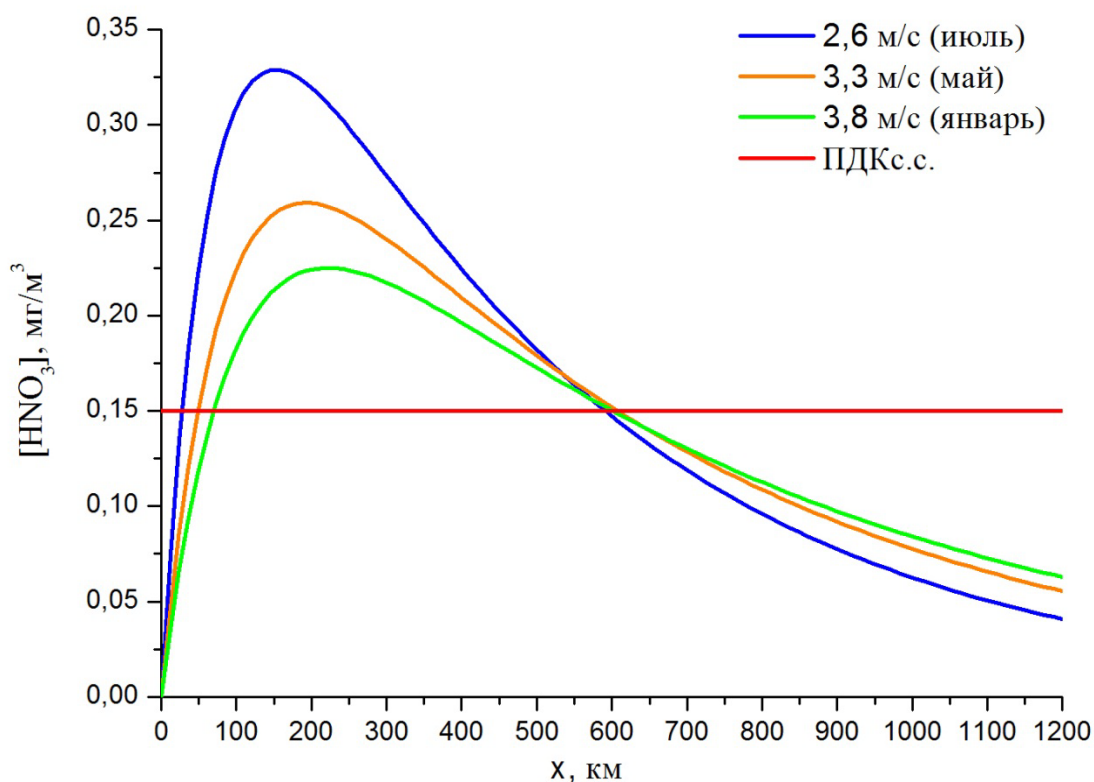


Рисунок 23 – Профили концентраций HNO_3 для трех скоростей ветра северного направления, рассчитанные по данным ЧерМК за 2014 год

5.2.2 Распределение серной кислоты

Проведем аналогичные расчеты для вторичного выброса H_2SO_4 . Значения максимумов концентрации и расстояний, на которых этот максимум появляется, приведены в таблицах 31 и 32.

Построим карты-схемы с нанесением изоконцентрационных линий в местах максимальных концентраций для двух месяцев, марта и июля (Рисунки 24-25). Цифрами обозначены значения концентраций в данных точках в $мг/м^3$.

На картах-схемах марта и июля наблюдается превышение ПДКс.с. (0,1 $мг/м^3$) и ПДКм.р. (0,3 $мг/м^3$) серной кислоты в атмосферном воздухе. Причем расстояния, на которых концентрация достигает максимума, составляет от 340 до 680 км. Конечно, на таких расстояниях скорость и направление ветра могут

кардинально отличаться от исходных значений, но это не означает, что вредные выбросы не могут распространяться на такие расстояния. В литературе немало подтверждений явлению распространения серной кислоты на большие расстояния вследствие долгого времени ее существования в атмосфере [108]. Поэтому вполне вероятно, что на расстояниях 400-600 км от города Череповец может наблюдаться превышение концентрации серной кислоты значений ПДКс.с. и ПДКм.р. вследствие серосодержащих выбросов предприятия ЧерМК.

Таблица 31 – Расстояние в км, на котором концентрация вторичного выброса H_2SO_4 достигает максимума при средней скорости ветра по данным ЧерМК за 2014 год

Направление ветра	Месяц											
	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12
с	586	556	571	525	509	432	401	417	463	540	571	586
с-в	478	463	432	417	417	386	340	324	370	432	463	478
в	525	540	478	509	525	463	401	448	463	478	478	509
ю-в	633	602	586	602	648	586	525	525	540	633	633	648
ю	648	648	679	648	648	586	509	509	571	664	664	741
ю-з	617	602	586	617	602	525	509	525	571	648	602	648
з	448	509	509	478	525	432	417	432	463	432	463	478
с-з	525	556	540	478	463	417	401	401	448	494	525	525

Таблица 32 – Значение максимальной концентрации вторичного выброса H_2SO_4 по данным ЧерМК за 2014 год, мг/м³

Направление ветра	Месяц											
	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12
с	0,33	0,35	0,34	0,37	0,38	0,45	0,48	0,47	0,42	0,36	0,34	0,33
с-в	0,41	0,42	0,45	0,47	0,47	0,50	0,57	0,60	0,52	0,45	0,42	0,41
в	0,37	0,36	0,41	0,38	0,37	0,42	0,48	0,43	0,42	0,41	0,41	0,38
ю-в	0,31	0,32	0,33	0,32	0,30	0,33	0,37	0,37	0,36	0,31	0,31	0,30
ю	0,30	0,30	0,29	0,30	0,30	0,33	0,38	0,38	0,34	0,29	0,29	0,26
ю-з	0,31	0,32	0,33	0,31	0,32	0,37	0,38	0,37	0,34	0,30	0,32	0,30
з	0,43	0,38	0,38	0,41	0,37	0,45	0,47	0,45	0,42	0,45	0,42	0,41
с-з	0,37	0,35	0,36	0,41	0,42	0,47	0,48	0,48	0,43	0,39	0,37	0,37

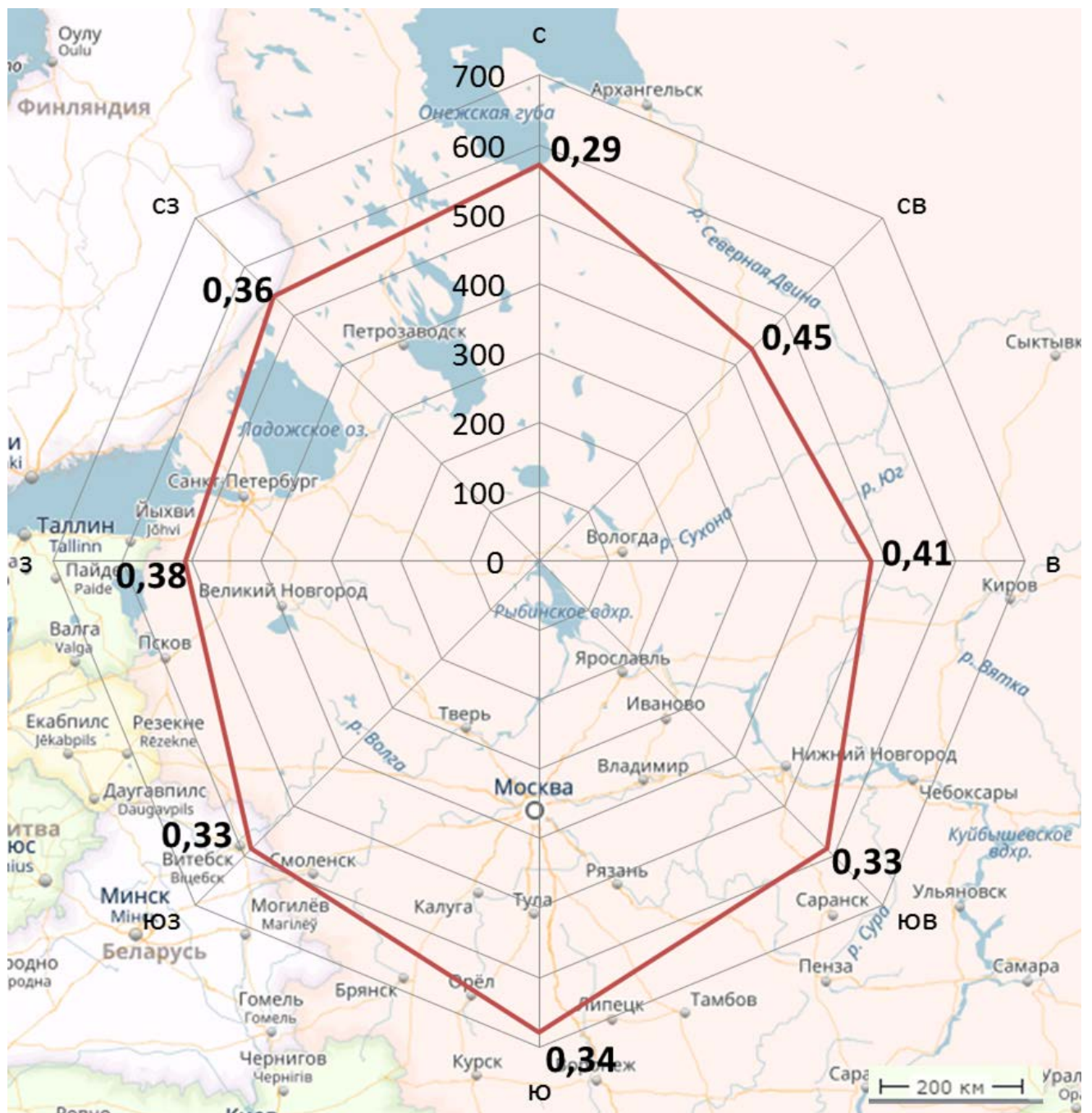


Рисунок 24 – Карта-схема изоконцентрационных линий вторичного выброса H_2SO_4 , где значения концентрации достигают максимума при средней скорости ветра **марта** по данным ЧерМК за 2014 год, цифрами обозначены значения концентраций в мг/м^3 , линией обозначено расстояние от источника до точки максимума

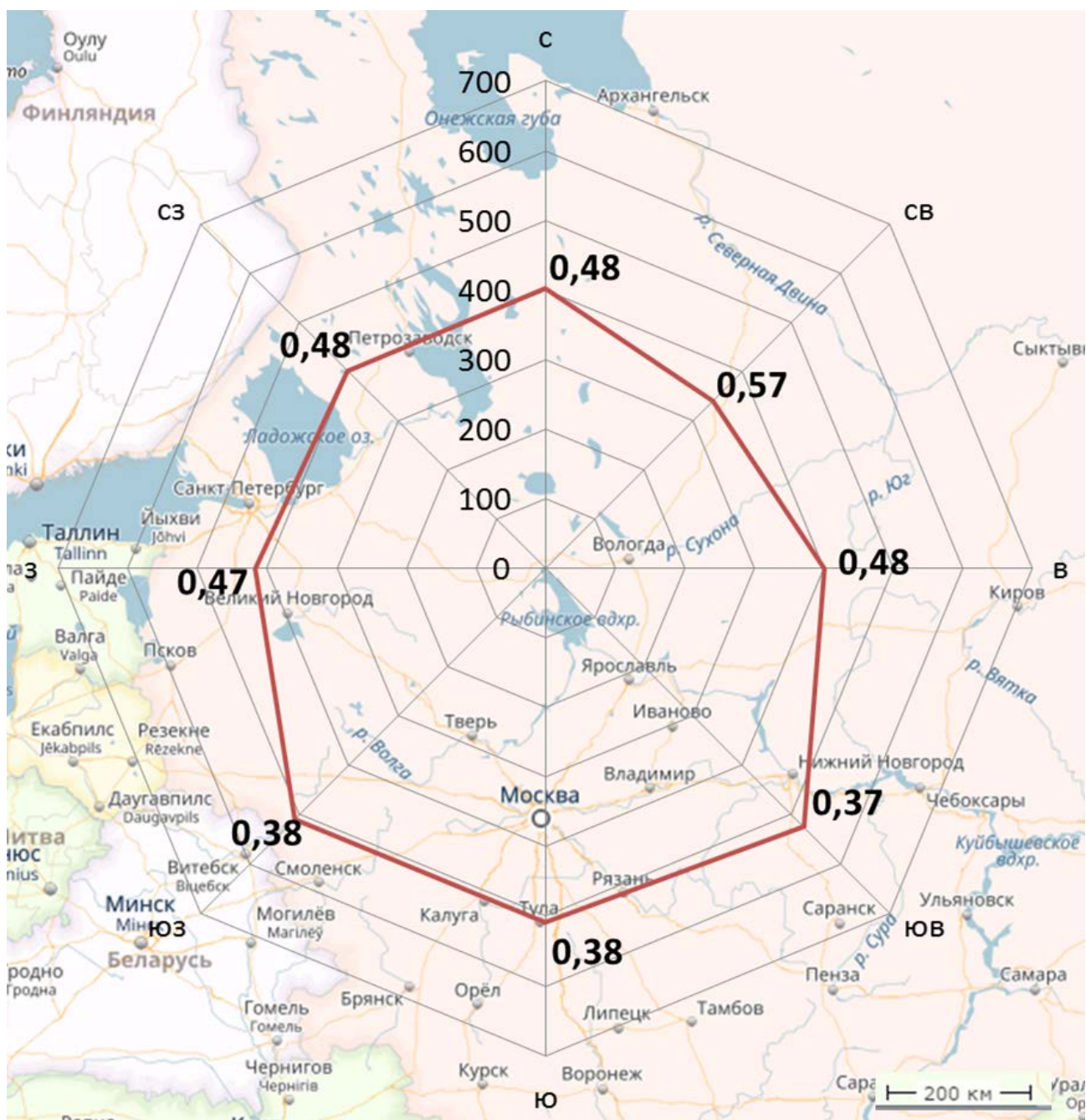


Рисунок 25 – Карта-схема изоконцентрационных линий вторичного выброса H_2SO_4 , где значения концентрации достигают максимума при средней скорости ветра **июля** по данным ЧерМК за 2014 год, цифрами обозначены значения концентраций в мг/м^3 , линией обозначено расстояние от источника до точки максимума

Для анализа изменения концентрация H_2SO_4 , на всем пути распространения вторичного выброса построим профили концентраций для нескольких средних скоростей ветра южного направления: средняя скорость февраля 4,2 м/с, июля 3,3

м/с и декабря 4,8 м/с. Полученные профили концентраций представлены на рисунке 26.

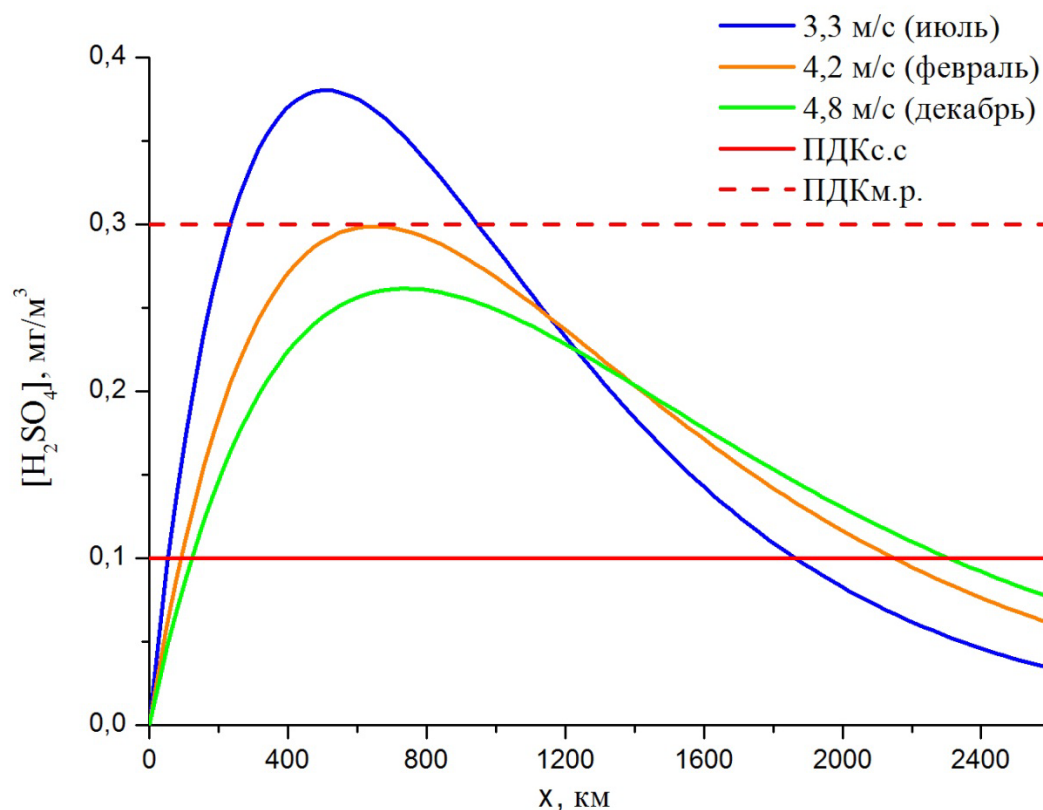


Рисунок 26 – Профили концентраций H_2SO_4 для трех скоростей ветра южного направления, рассчитанные по данным ЧерМК за 2014 год

На рисунке 26 видно, что пик профиля концентрации серной кислоты достаточно широкий, в связи с этим расстояния, на которых концентрации превышают ПДКс.с., для всех месяцев и составляют от 50 до 2300 км от ЧерМК. Наиболее опасным месяцем для северного направления является июль, где концентрация H_2SO_4 может превышать ПДКм.р. с вероятностью 16%.

5.3 Распределение вторичных загрязнителей предприятия ММК

5.3.1 Распределение азотной кислоты

Проведем расчеты полей концентраций для предприятия ОАО «ММК». Для предприятия ММК исходные данные для расчетов приводились ранее в главе 3. Рассчитаем максимально возможную концентрацию вторичного выброса HNO_3 при средней месячной скорости ветра. В таблице 33 приведены данные о расстоянии, на котором концентрация HNO_3 будет иметь максимальное значение, приведенное в таблице 34.

Таблица 33 – Расстояние в км, на котором концентрация вторичного выброса HNO_3 достигает максимума при средней скорости ветра по данным ММК за 2013 год

Направление ветра	Месяц											
	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12
с	117	175	234	117	350	350	234	234	175	117	117	175
с-в	58	234	350	292	350	292	292	292	234	234	292	234
в	117	234	117	292	292	234	292	292	117	117	234	234
ю-в	117	58	117	117	292	175	234	175	117	117	175	175
ю	175	117	117	350	292	175	292	292	234	234	234	117
ю-з	117	117	234	350	234	292	234	234	234	292	234	292
з	58	350	234	467	350	350	292	234	292	292	292	234
с-з	58	58	292	292	292	350	350	292	175	292	175	175

Таблица 34 – Значение максимальной концентрации вторичного выброса HNO_3 по данным ММК за 2013 год, мг/м^3

Направление ветра	Месяц											
	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12
с	0,22	0,15	0,11	0,22	0,07	0,07	0,11	0,11	0,15	0,22	0,22	0,15
с-в	0,45	0,11	0,07	0,09	0,07	0,09	0,09	0,09	0,11	0,11	0,09	0,11
в	0,22	0,11	0,22	0,09	0,09	0,11	0,09	0,09	0,22	0,22	0,11	0,11
ю-в	0,22	0,45	0,22	0,22	0,09	0,15	0,11	0,15	0,22	0,22	0,15	0,15
ю	0,15	0,22	0,22	0,07	0,09	0,15	0,09	0,09	0,11	0,11	0,11	0,22
ю-з	0,22	0,22	0,11	0,07	0,11	0,09	0,11	0,11	0,11	0,09	0,11	0,09
з	0,45	0,07	0,11	0,06	0,07	0,07	0,09	0,11	0,09	0,09	0,09	0,11
с-з	0,45	0,45	0,09	0,09	0,09	0,07	0,07	0,09	0,15	0,09	0,15	0,15

Для наглядности полученного результата построим карты-схемы с нанесением изоконцентрационных линий в местах максимальных концентраций для двух месяцев, января и декабря (Рисунки 27-28). Цифрами обозначены значения концентраций в данных точках в мг/м^3 .

Рисунки 27 и 28 демонстрируют, какое значение имеет выбор интервала времени для расчета поля концентраций выбросов. Данные, полученные для двух зимних месяцев, кардинально отличаются друг от друга, поэтому рассчитывать поле средних годовых концентраций не имеет практического значения.

На карте-схеме, построенной для декабря превышения ПДКс.с. ($0,15 \text{ мг/м}^3$) наблюдается только в южном направлении с вероятностью 12%. В январе при устойчивых метеоусловиях, соответствующих средним показателям, превышение ПДКс.с. происходит практически по всем направлениям. В северо-восточном, западном и северо-западном направлениях вероятность достижения концентрацией значения $0,45 \text{ мг/м}^3$ (при $\text{ПДКм.р.}=0,4 \text{ мг/м}^3$) составляет соответственно 7%, 20% и 3%.

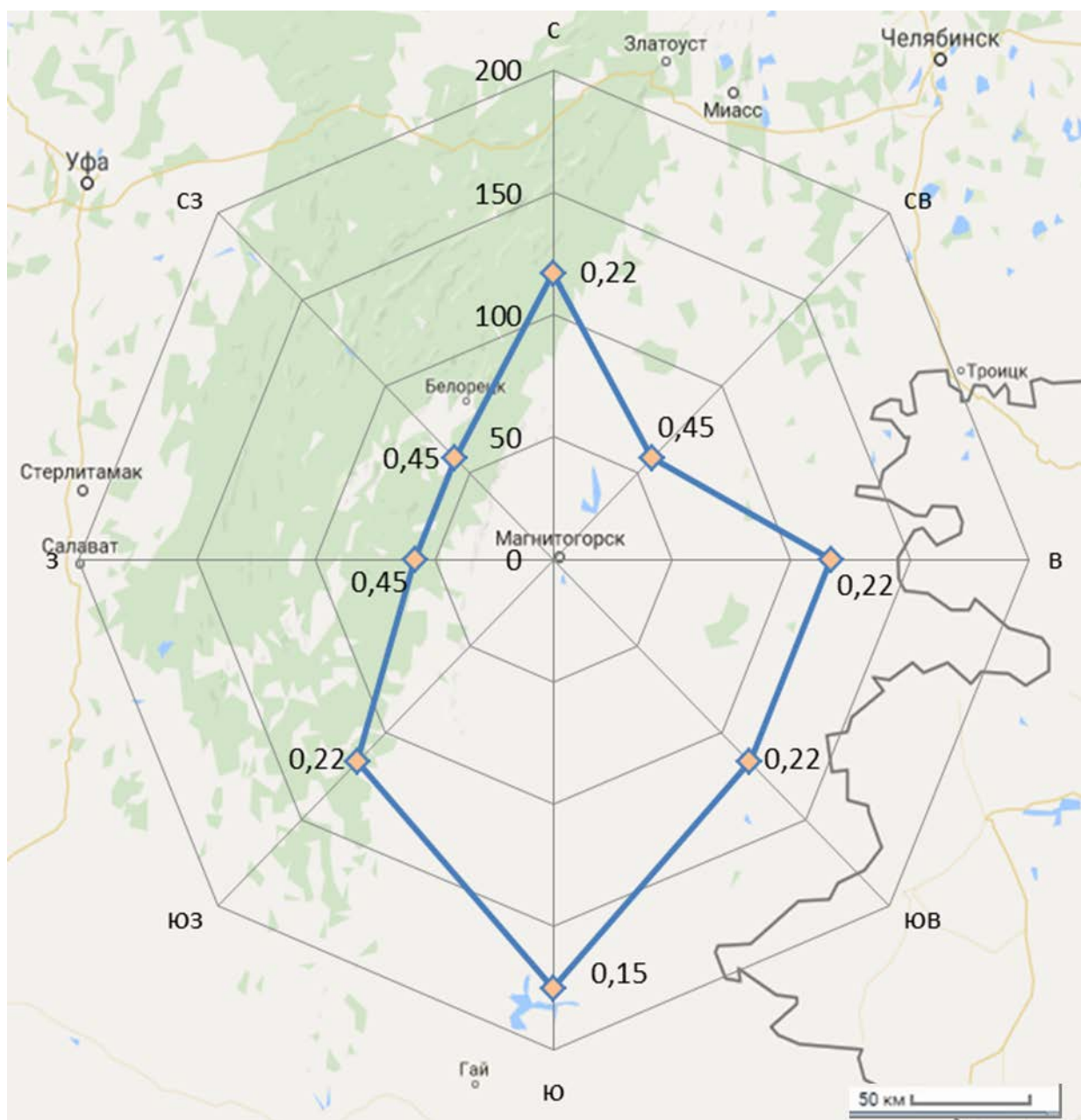


Рисунок 27 – Карта-схема изоконцентрационных линий вторичного выброса HNO_3 , где значения концентрации достигают максимума при средней скорости ветра **января** по данным ММК за 2013 год, цифрами обозначены значения концентраций в мг/м^3 , линией обозначено расстояние от источника до точки максимума

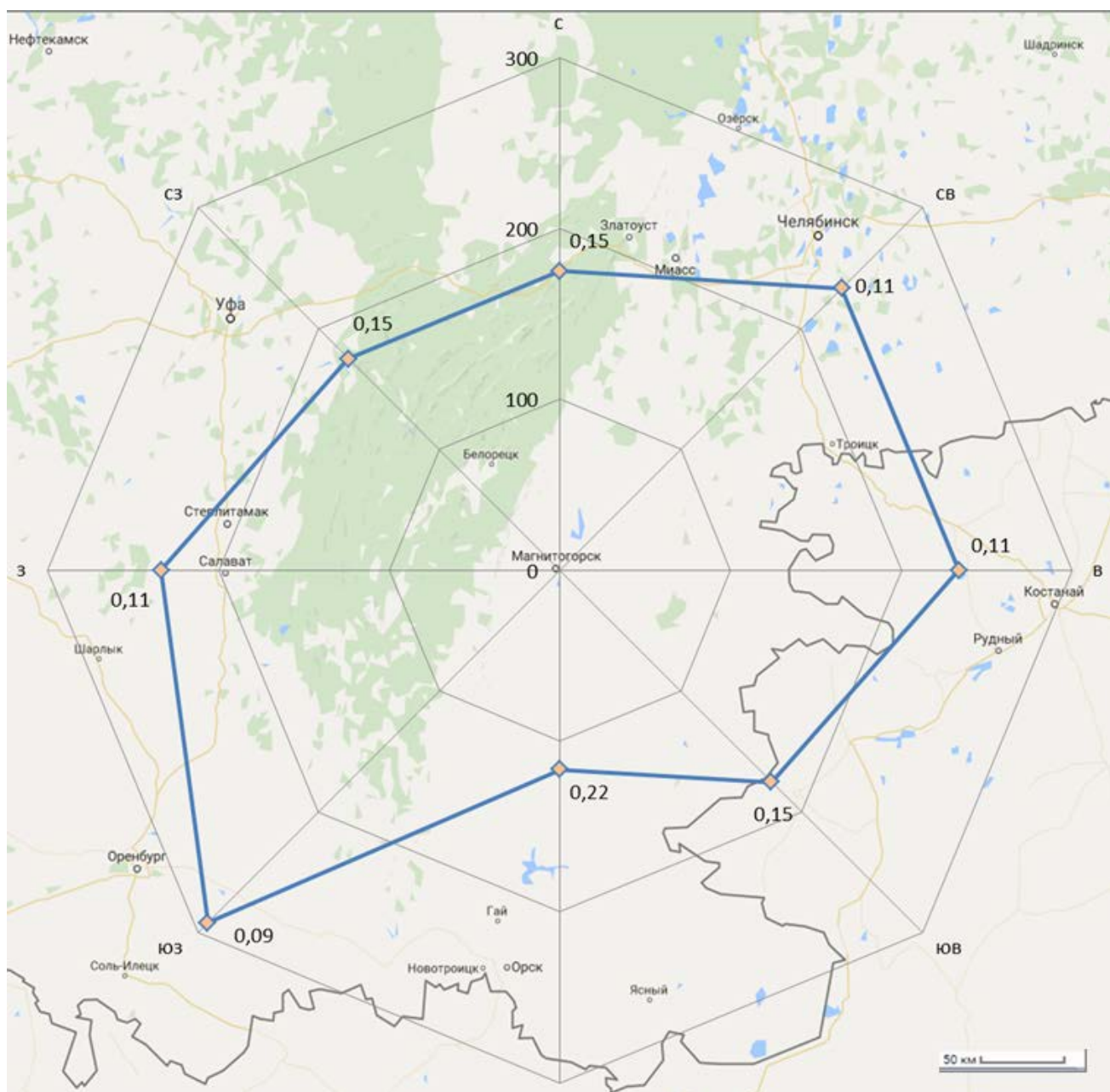


Рисунок 28 – Карта-схема изоконцентрационных линий вторичного выброса HNO_3 , где значения концентрации достигают максимума при средней скорости ветра **декабря** по данным ММК за 2013 год, цифрами обозначены значения концентраций в мг/м^3 , линией обозначено расстояние от источника до точки максимума

Для анализа изменения концентрация HNO_3 на всем пути распространения вторичного выброса построим профили концентраций для нескольких средних скоростей ветра восточного направления: средняя скорость января 2 м/с, февраля

4 м/с и сентября 5 м/с. Полученные профили концентраций представлены на рисунке 29.

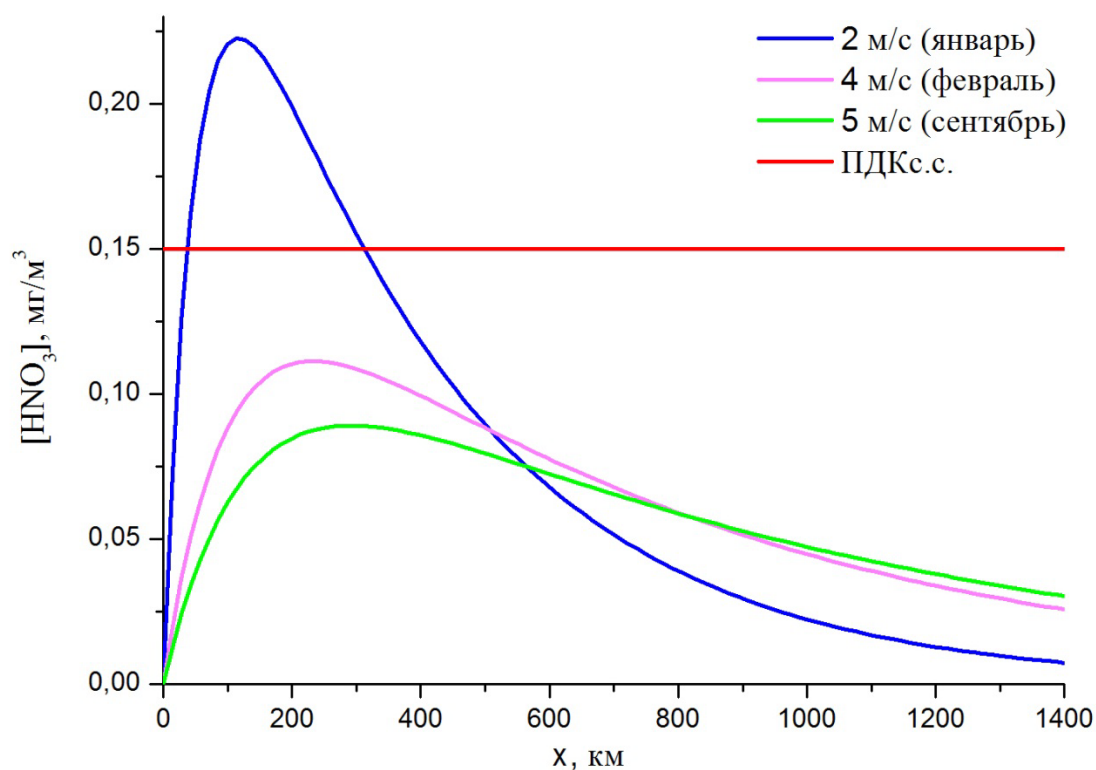


Рисунок 29 – Профили концентраций HNO_3 для средних скоростей ветра декабря месяца, рассчитанные по данным ММК за 2013 год

В восточном направлении превышение ПДКс.с. наблюдается в январе на расстояниях от 40 до 310 км с вероятностью 3%. В феврале и сентябре в этом направлении превышений не наблюдается.

5.3.2 Распределение серной кислоты

Проведем расчеты максимальных концентраций для вторичного выброса H_2SO_4 . Значения максимумов концентрации и расстояний, на которых этот максимум появляется, приведены в таблицах 35 и 36.

Таблица 35 – Расстояние в км, на котором концентрация вторичного выброса H_2SO_4 достигает максимума при средней скорости ветра по данным ММК за 2013 год

Направление ветра	Месяц											
	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12
с	309	463	617	309	926	926	617	617	463	309	309	463
с-в	154	617	926	772	926	772	772	772	617	617	772	617
в	309	617	309	772	772	617	772	772	309	309	617	617
ю-в	309	154	309	309	772	463	617	463	309	309	463	463
ю	463	309	309	926	772	463	772	772	617	617	617	309
ю-з	309	309	617	926	617	772	617	617	617	772	617	772
з	154	926	617	1235	926	926	772	617	772	772	772	617
с-з	154	154	772	772	772	926	926	772	463	772	463	463

Таблица 36 – Значение максимальной концентрации вторичного выброса H_2SO_4 по данным ММК за 2013 год, мг/м³

Направление ветра	Месяц											
	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12
с	0,13	0,09	0,07	0,13	0,04	0,04	0,07	0,07	0,09	0,13	0,13	0,09
с-в	0,26	0,07	0,04	0,05	0,04	0,05	0,05	0,05	0,07	0,07	0,05	0,07
в	0,13	0,07	0,13	0,05	0,05	0,07	0,05	0,05	0,13	0,13	0,07	0,07
ю-в	0,13	0,26	0,13	0,13	0,05	0,09	0,07	0,09	0,13	0,13	0,09	0,09
ю	0,09	0,13	0,13	0,04	0,05	0,09	0,05	0,05	0,07	0,07	0,07	0,13
ю-з	0,13	0,13	0,07	0,04	0,07	0,05	0,07	0,07	0,07	0,05	0,07	0,05
з	0,26	0,04	0,07	0,03	0,04	0,04	0,05	0,07	0,05	0,05	0,05	0,07
с-з	0,26	0,26	0,05	0,05	0,05	0,04	0,04	0,05	0,09	0,05	0,09	0,09

Анализ распределения концентраций вторичных газовых выбросов конкретных предприятий вдоль всех направлений розы ветров позволяет построить полное стационарное пространственное поле распределения концентраций вторичного выброса во внешней зоне влияния металлургического предприятия.

Для построения изоконцентрационных линий необязательно рассчитывать все значения концентраций от источника до расстояния, на котором концентрация

снижается до фонового уровня, как это сделано в главе 3. Достаточно найти расстояния, на которых концентрация достигает значения ПДК или долей ПДК. Для этого в формуле (31) заменим C_B на $nC_{\text{ПДК}}$, где n – доля ПДК

$$nC_{\text{ПДК}} = C_A^0 \frac{M_B}{M_A} \frac{k_1}{k_2 - k_1} \left(e^{-\frac{k_1}{v}x} - e^{-\frac{k_2}{v}x} \right). \quad (31)$$

Введем некоторые обозначения:

$$D = \frac{C_{\text{ПДК}}}{C_A^0} \frac{M_A}{M_B} \frac{k_2 - k_1}{k_1};$$

$$A = -\frac{k_1}{v}; B = \frac{k_2}{v};$$

$$nD = e^{Ax} - e^{Bx}.$$

Разделим обе части уравнения на e^{Ax} :

$$\frac{nD}{e^{Ax}} = 1 - e^{(B-A)x}.$$

Обозначим $l = e^{(B-A)x}$ и $m = \frac{-A}{B-A}$.

Тогда уравнение (31) можно переписать в виде:

$$nDl^n = 1 - l,$$

или

$$nDl^n + l - 1 = 0. \quad (32)$$

С помощью математических приложений, например MathCad, находим l при различных коэффициентах n . Из формулы: $x = \frac{\ln t}{B-A}$, находим значения x , при которых концентрация достигает 0,5ПДК, ПДК, 2ПДК и т.п.

Для иллюстрации данного метода расчета построим изоконцентрационные линии распространения серной кислоты в регионе предприятия ОАО «ММК». На рисунках 30 и 31 изоконцентрационные линии наложены на карту местности для двух месяцев – сентября и июля.

Для наглядности были выбраны 2 месяца, розы ветров которых имеют существенные отличия. Отличия в розах ветров отражаются в пространственном

распределении концентраций. Сентябрьская карта-схема содержит максимум концентрации H_2SO_4 , который превышает значение $\text{ПДК}_{\text{СС}}$, максимум концентрации июльской карты-схемы ниже (числа на изоконцентрационных линиях показывают отношение концентрации H_2SO_4 к значению $\text{ПДК}_{\text{СС}}$). Весь характер распределения H_2SO_4 для двух приведенных периодов времени сильно отличается друг от друга, что видно по расположению и количественным значениям концентраций на изоконцентрационных линиях. В качестве общей характеристики можно привести средний размер области, внутри которой концентрация H_2SO_4 может превышать $\frac{1}{2} \text{ПДК}_{\text{СС}}$ – этот размер в обоих случаях превышает 1,5 тысячи км.

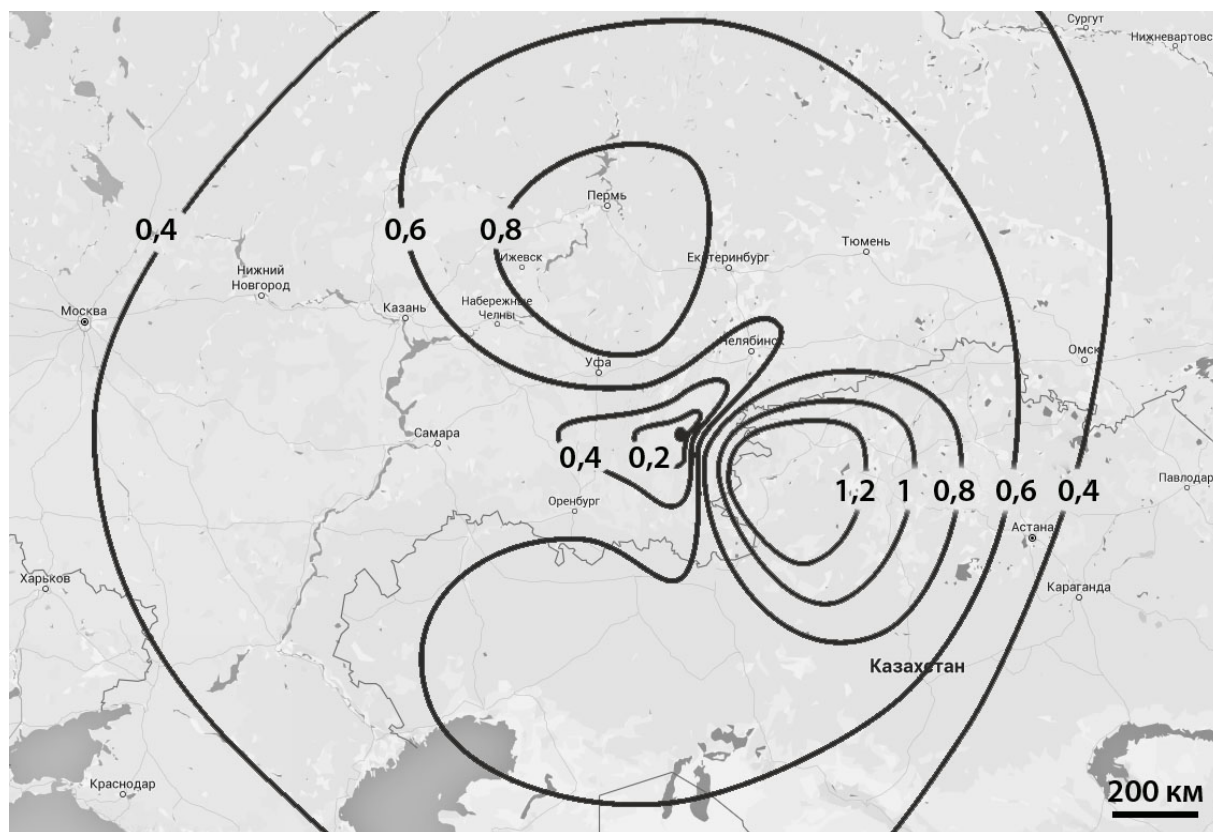


Рисунок 30 – Карта-схема распространения вторичного выброса H_2SO_4 в регионе ОАО «ММК» в соответствии со средней розой ветров сентября

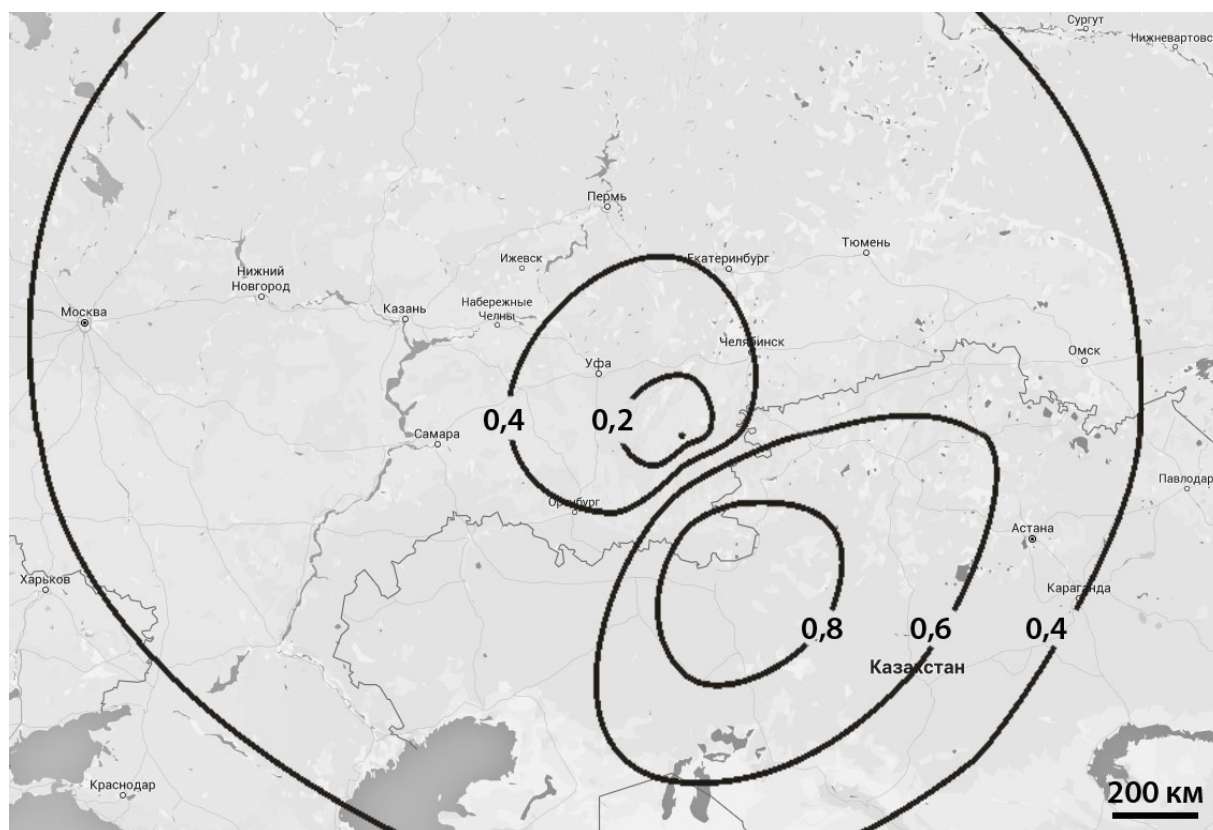


Рисунок 31 – Карта-схема распространения вторичного выброса H_2SO_4 в регионе ОАО «ММК» в соответствии со средней розой ветров июля

ВЫВОДЫ

1. Разработан принцип превращения компонентов первичных газовых выбросов металлургических предприятий во вторичные вещества (вторичные выбросы), названный принципом непрерывного пространственного распределенного источника вторичных загрязнителей.
2. Предложен общий метод (модель) расчета поля концентраций вторичных загрязнителей металлургического происхождения во внешней зоне влияния предприятий, основанный на принципе непрерывного пространственного распределенного источника.
3. Получено численное решение расчетной модели с построением поля концентраций вторичных веществ металлургического происхождения во внешних зонах влияния металлургических центров.
4. При построении полей концентраций вторичных загрязнителей установлено, что функция распределения концентраций вторичных загрязнителей имеет максимум, и значение максимума в зависимости от скорости ветра и других параметров может превышать предельно допустимые концентрации данного вещества. Географические координаты и величина концентрации в максимуме однозначно определяются с помощью численного решения модели.
5. Предложен физико-химический механизм пространственного превращения первичных загрязнителей во вторичные, который заключается в двустадийном процессе образования и гибели вредных летучих кислот в атмосфере при их одновременном распространении в пространстве.
6. Получено аналитическое решение для расчета стационарных полей концентраций вторичных веществ, основанное на физико-химическом механизме; показано, что результаты вычислений, полученные аналитически и с помощью численного алгоритма, совпадают для одних и тех же предприятий в одинаковых внешних условиях.
7. Освоен способ использования полученных схем распределения первичных и вторичных металлургических загрязнителей для получения ежемесячных

прогнозов расположения территорий с максимально возможным уровнем опасности от вредных компонентов выбросов. Этот метод опробован при построении ежемесячных полей концентрации первичного выброса SO_2 в зоне влияния предприятия ОАО «Тулачермет» и вторичного загрязнителя H_2SO_4 в зоне влияния предприятия ОАО «ММК». Показано, что данный метод расчета позволяет давать прогнозы уровня опасности на любой промежуток времени, который определяется интервалом устойчивого прогноза погоды в заданном регионе.

8. Произведен детальный расчет распределения концентраций вторичных летучих кислот – HNO_3 и H_2SO_4 - во внешних областях влияния трех металлургических комбинатов полного цикла: НЛМК, ЧерМК и ММК. Построены ежемесячные прогнозные географические карты-схемы расположения зон максимальной опасности.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Петелин А.Л., Юсфин Ю.С., Орелкина Д.И., Вишнякова К.В. Прогнозирование опасности распространения газовых выбросов металлургических предприятий в воздушном пространстве (в приземных слоях атмосферы) за пределами промышленных центров // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2013. – № 9. – С. 3-8.
Версия: Petelin, A.L., Yusfin, Y.S., Orelkina, D.I., Vishnyakova, K.V. Predicting the risk of generalized air pollution by metallurgical enterprises // Steel in Translation. – 2013– Vol. 43 – Issue 9 –P. 539-543.
2. Orelkina D.I., Petelin A.L., Yusfin Y.S., Novikov A.A., Podgorodetskii G.S. Prediction of metallurgical gas emissions spreading outside of the industrial centers // SGEM2014 Conference Proceedings. – 2014. – Vol. 2. – P. 481-486.
3. Орёлкина Д.И., Петелин А.Л., Юсфин Ю.С., Подгородецкий Г.С. Прогнозирование распространения газовых выбросов металлургических предприятий во внешней зоне влияния промышленных центров. // Материалы Одиннадцатой Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Современные проблемы горно-металлургического комплекса. Наука и производство». 3-5 декабря 2014г. Старый Оскол. – С. 58-65.
4. Орелкина Д.И., Петелин А.Л., Полулях Л.А. Анализ пространственного распределения вторичных газовых выбросов во внешней зоне влияния предприятий черной металлургии // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2015 – №11. – С. 793–797.
Версия: Orelkina D.I., Petelin A.L., Polulyakh L.A. Distribution of secondary gas emissions around steel plants // Steel in Translation. – 2015. – Vol. 45. – Issue 11. – P. 811-814.
5. Орёлкина Д.И. , Петелин А.Л., Дмитриев И.Э. , Подгородецкий Г.С. , Юсфин Ю.С. Газовые выбросы металлургических предприятий. Зоны влияния в

приземных слоях атмосферы // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2016. – № 4 (часть 6) – С. 1062-1068.

6. Орелкина Д.И., Петелин А.Л., Полулях Л.А., Подгородецкий Г.С. Модель расчета концентрации вторичных металлургических выбросов в атмосфере. Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2016. – №5. – С. 300–305.

Версия: Orelkina D.I., Petelin A.L., Polulyakh L.A., Podgorodetskii G.S. Modeling the Atmospheric Concentration of Secondary Steel-Plant Emissions// / Steel in Translation, Volume 46, Issue 5, 2016, Pages 309–312

7. Петелин А.Л., Орёлкина Д.И., Полулях Л.А., Козлова О.Н. Кинетика образования и распространения в атмосфере вторичных газовых выбросов металлургических предприятий // Экология и промышленность России. – 2016. – Т. 20. – № 9. – С. 26 – 29.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Оценка риска здоровья населения при загрязнении атмосферного воздуха населенных мест техногенными выбросами и продуктами их превращений Хадарцев А.А., Хрупачев А.Г., Кашинцева Л.В., Ганюков С.П., Платонов В.В. Экология промышленного производства. – 2012. – № 4. – С. 37-42.
2. Аникушкин, А.С. Загрязнение атмосферы оксидами азота и углерода / А.С. Аникушкин, К.В. Григорчук // Успехи современного естествознания. – 2006. – № 10. – С. 64-66.
3. Ганюков, С.П. Обоснование нового подхода к оценке риска здоровью населения, обусловленного воздействием техногенных выбросов и продуктами их трансформации / С.П. Ганюков, Е.М. Алиякберова // Экология урбанизированных территорий. – 2012. – № 4. – С. 62-69.
4. Рубцов, Д.Е. Аэрозольное загрязнение атмосферы / Д.Е. Рубцов // Успехи современного естествознания. – 2010. – № 7. – С. 14.
5. Ефремов, И.В. Оптимизация пространственно-временной сети мониторинга загрязнений атмосферы на основе методов линейной интерполяции / И.В. Ефремов, Е.Л. Янчук // Вестник Оренбургского государственного университета. – 2004. – № 2. – С. 127-129.
6. Гонцов, Я.А. Моделирование химических процессов в нижней атмосфере регионов российской федерации / Я.А. Гонцов, С.П. Смышляев, А.Р. Курганский, С.В. Мостаманди // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. – 2011. – № 22. – С. 183-194.
7. Ефремов, И.В. Оптимизация пространственно-временной сети мониторинга загрязнений атмосферы на основе методов линейной интерполяции / И.В. Ефремов, Е.Л. Янчук // Вестник Оренбургского государственного университета. – 2004. – № 2. – С. 127-129.

8. Методическое пособие по расчету, нормированию и контролю выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух. – Доп. и перераб. – СПб.: НИИ Атмосфера, 2005.
9. Агальцова, С.И. Загрязнение атмосферы и наше здоровье / С.И. Агальцова // Пест-Менеджмент. – 2007. – № 4. – С. 26-28.
10. Савичев, А.В. Загрязнение атмосферы / А.В. Савичев, М.В. Калиниченко // Успехи современного естествознания. – 2010. – № 7. – С. 14-15.
11. Безуглая Э.Ю. Воздух городов и его изменения / Э.Ю. Безуглая, И.В. Смирнова // СПб.: Астерион, 2008. – 254 с.
12. Султангузин, И.А. Оптимизация коксохимического и сталеплавильного производств по энергетическому и экологическому критериям / И.А. Султангузин, М.В. Исаев, С.Ю. Курзанов // Metallurg. – 2010. – №. 9. – С. 51-55.
13. Хадарцев, А.А., Хрупачев Трансформация техногенных выбросов в атмосферном воздухе населенных мест и ее влияние на популяционное здоровье / А.А. Хадарцев, А.Г. Хрупачев, С.П. Туляков, Н.Д. Левкин, С.П. Ганюков, В.В. Платонов, В.С. Хмелевцов // Вестник новых медицинских технологий. – 2010. – Т. 17. – № 3. – С. 194-198.
14. Садыкова, Р.Ш. Эколого-экономическая оценка воздействия ОАО «Химпром» на окружающую среду / Р.Ш. Садыкова // Ученые записки Альметьевского государственного нефтяного института. – 2009. – Т. 7. – С. 272-275.
15. Кормина, Л.А. Экологические проблемы коксохимических производств / Л.А. Кормина // Сборник трудов конференции: Региональные экологические проблемы Межрегиональная научно-практическая конференция. – 2012. – С. 48-51.
16. Вяткин, А.А. Новый подход к проектированию систем рециркуляции отходящих газов в агломерационном производстве / А.А. Вяткин, С.С. Скачкова, Е.Г. Дмитриева, Р.Н. Шумилов, А.Ю. Морозов // Сталь. – 2008. – № 5. – С. 9-13.

17. Вяткин, А.А. Рециркуляция пылегазовых выбросов агломерационных производств: технические и экологические аспекты / А.А. Вяткин, Е.Г. Дмитриева, Я.И. Калугин, А.В. Малыгин // Черная металлургия. – 2011. – № 11 (1343). – С. 73-77.
18. Коршиков, Г.В. Основные факторы, определяющие энергетические затраты и выбросы CO₂ в доменном производстве / Г.В. Коршиков, В.Н. Титов, В.Г. Михайлов // Сталь. – 2013. – № 7. – С. 93-98.
19. Лазуткин А.Е. Перспективные пути энергосбережения в доменном производстве России / А.Е. Лазуткин, А.Г. Чижилов, Е.Х. Шахпазов // Проблемы черной металлургии и материаловедения. – 2010. – № 1. – С. 5-12.
20. Нойхольд, Р. Инновационная сухая газоочистка при производстве чугуна и стали / А. Фляйшандерль, Т. Платтнер, И. Кофлер // Черные металлы. – 2015. – № 4 (1000). – С. 40-42.
21. Шаймарданов, В.Х. Исследование процесса очистки дымовых газов мартеновского производства от вредных примесей / В.Х. Шаймарданов // Вестник КИГИТ. – 1998. – № 1. – С. 161-168.
22. Бурлаченко, О.В. Анализ особенностей формирования качественного и количественного состава выбросов в атмосферный воздух городской среды от источников электросталеплавильных цехов / О.В. Бурлаченко, Е.А.Семенова, Н.М. Сергина, И.А. Гвоздков // Современная наука и инновации. – 2015. – № 4 (12) – С. 81-86.
23. Лозин, Г.А. Совершенствование структуры газоотводящей системы электросталеплавильного производства / Лозин, Г.А. // Сталь. – 2008. – № 4 – С. 84-87.
24. Тахаутдинов, Р.С. Кислородно-конвертерное производство ОАО «ММК» / Р.С. Тахаутдинов, Ю.А. Бодяев, В.М. Корнеев, И.М. Закаров, В.С. Климов // Металлург. – 2007. – № 1. – С. 43-44.
25. Мاستрюков, Б.С. Аварийные выбросы в металлургическом производстве и специфика их распространения / Б.С. Мاستрюков, А.М. Меркулова // Металлург. – 2009. – № 1. – С. 25-28.

26. Перистый, М.М. Пути снижения техногенной нагрузки сталеплавильного производства на окружающую среду / М.М. Перистый, А.В. Кравченко // Электromеталлургия. – 2008. – № 9. – С. 41-44.
27. Павлович, Л.Б. Оценка экологического риска от выбросов литейного производства в атмосферу / Л.Б. Павлович, В.В. Садыхова, Д.А. Шульдишева // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. – 2014. – № 4 (10). – С. 52-55.
28. Социальный отчет за 2005 год [Электронный ресурс] // Открытое акционерное общество «Магнитогорский металлургический комбинат». – Режим доступа: http://mmk.ru/about/responsibility/social_report/.
29. Литвинова, Н.А. Оценка содержания оксида углерода (II) в атмосферном воздухе по высоте от поверхности земли / Н.А. Литвинова // Вестник Тюменского государственного университета. Экология и природопользование. 2015. – Т. 1. – № 3 (3). – С. 156-162.
30. Чаева, Е.В. Загрязнение атмосферного воздуха и иммунная защита легких / Е.В. Чаева, Т.К. Шинтаев, Н.И. Алексеева, А.Н. Микеров // Бюллетень медицинских интернет-конференций. – 2013. – Т. 3. – № 2. – С. 339.
31. Уразгулова, М.М. Тенденция изменения состояния атмосферного воздуха в промышленном центре / М.М. Уразгулова, Н.В. Ксандров, С.А. Матвеева // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2015. – № 7-2. – С. 347-351.
32. Полосков, И.Е. О стохастическом моделировании переноса загрязнений в атмосфере / И.Е. Полосков, А.Л. Ветров // Вестник Пермского университета. Серия: Математика. Механика. Информатика. – 2008. – № 4. – С. 137-140.
33. Свистов, П.Ф. О пространственно-временных изменениях кислотности атмосферных осадков / П.Ф. Свистов, А.С. Талаш, Е.С. Семенец // Климат и природа. – 2016. – № 2 (19). – С. 14-26.
34. Еремина, И.Д. Мониторинг химического состава атмосферных осадков по наблюдениям метеорологической обсерватории МГУ / И.Д. Еремина //

- Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология. – 2013. – № 6-2 (128). – С. 80-87.
35. Свистов, П.Ф. Рекомендации по использованию в природоохранной практике данных о химическом составе и кислотности атмосферных осадков / П.Ф. Свистов, А.С. Талаш, И.Д. Павлова // Экология урбанизированных территорий. – 2015. – № 1. – С. 57-64.
 36. Качановский, Ф.В. Связь кислотности атмосферных осадков, выпадающих в Твери, с их количеством / Ф.В. Качановский // Вестник Тверского государственного технического университета. – 2015. – № 1 (27). – С. 34-39.
 37. Свистов, П.Ф. Атмосферные осадки: химический состав и кислотность / П.Ф. Свистов, Н.А. Першина, М.Т. Павлова // Природа. – 2015. – № 6 (1198). – С. 28-36.
 38. Першина, Н.А. К вопросу о закислении атмосферных осадков в Российской Арктике / Н.А. Першина, А.И. Полищук, П.Ф. Свистов // Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова. – 2008. – № 558. – С. 211-232.
 39. Егоров, В.Д. Модели эволюции кислотности в атмосфере с использованием спутниковых наблюдений облачности и атмосферных осадков / В.Д. Егоров, В.В. Козодеров // Исследование Земли из космоса. – 2006. – № 4. – С. 52-64.
 40. Ларин, И.К. Российские исследования в области атмосферной химии в 2003-2006 гг. / И.К. Ларин // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. – 2009. – Т. 45. – № 2. – С. 209-217.
 41. Еремина, И.Д. Кислотность и химический состав осадков на территории Московского региона в теплый период года / И.Д. Еремина, Н.Е. Чубарова, Л.И. Алексеева, Г.В. Суркова // Вестник Московского университета. Серия 5: География. – 2014. – № 5. – С. 3-11.
 42. Ларин, И.К. Российские исследования в области атмосферной химии в 2011–2014 гг. / И.К. Ларин // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. – 2016. – Т. 52. – № 2. – С. 167.
 43. Еремина, И.Д. Кислотность и минеральный состав осадков в Москве. Влияние противогололедных реагентов / И.Д. Ерёмина, А.Е. Алоян, В.О. Арутюнян,

- И.К. Ларин, Н.Е. Чубарова, А.Н. Ермаков // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. – 2015. – Т. 51. – № 6. – С. 700.
44. Мелешко, В.П. К вопросу о предотвращении глобального потепления посредством рассеивания сульфатного аэрозоля в атмосфере / В.П. Мелешко, В.М. Катцов, И.Л. Кароль // Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова. – 2010. – № 561. – С. 7-27.
45. Маслова, И.Я. Воздействие содержащих серу аэротехногенных веществ на некоторые агрохимически значимые процессы и свойства почв / И.Я. Маслова // Агрохимия. – 2008. – № 6. – С. 80-94.
46. Ветров, В.А. Кислотность атмосферных осадков и выпадение серы и азота на территории Российской Федерации по данным мониторинга химического состава снежного покрова / В.А. Ветров, В.В. Кузовкин, Д.А. Манзон // Метеорология и гидрология. – 2015. – № 10. – С. 44-53.
47. Свистов, П.Ф. Исследование химического состава и кислотности атмосферных осадков для анализа загрязнения и самоочищения природной среды / П.Ф. Свистов // Климат и природа. – 2013. – № 4 (9). – С. 14-30.
48. Дрижерукова, Т.А. Новые нормативные и методические документы в области воздухоохранной деятельности / Т.А. Дрижерукова // Охрана окружающей среды и природопользование. – 2014. – № 4. – С. 15-27.
49. Прохорова, К.С. Кислотные оксиды. Образование кислотных дождей / К.С. Прохорова, Д.Д. Марченко, Л.В. Давыденко // Юный ученый. – 2015. – № 3 (3). – С. 141-143.
50. Семенов, А.В. Кислотный дождь / А.В. Семенов, Р.В. Шарапов // Современные проблемы науки и образования. – 2009. – № 3-1. – С. 90-91.
51. Вронский, В.А. Кислотные дожди: экологический аспект / Вронский В.А. // Биология в школе. – 2006. – № 3. – С. 3-6.
52. Сибриков, С.Г. Как образуются кислотные дожди / С.Г. Сибриков // Химия в школе. – 2007. – № 10. – С. 7-11.
53. Широков, С.Н. Куда ушли "кислотные" дожди? / С.Н. Широков // Промышленная энергетика. – 2008. – № 7. – С. 51-53.

54. Тарасова, Т.Ф. Оценка воздействия кислотных дождей на элементы экосистемы промышленного города / Т.Ф. Тарасова, О.В. Чаловская // Вестник Оренбургского государственного университета. – 2005. – № 10-2. С. – 80-84.
55. Грачев, В.А. Проблема кислотных дождей на среднем Урале / В.А. Грачев // Уральский геологический журнал. – 2001. – № 1. – С. 145-156.
56. Данилов, А.П. Влияние разрушающих компонентов, в том числе и серы, на окружающую среду и методы ее извлечения / А.П. Данилов // Уголь. – 2011. – № 7 (1023). – С. 60-61.
57. Корняков, А.Б. Расчет концентрации выбросов вредных веществ в атмосферу при наличии нескольких источников загрязнений / А.Б. Корняков, Е.В. Троицкая // Экологические системы и приборы. – 2013. – № 8. – С. 12-15.
58. Арнаутова, Е.С. «Кислотные осадки», как одна из глобальных экологических проблем. последствия и некоторые пути решения / Е.С. Арнаутова // Научно-образовательный потенциал молодежи в решении актуальных проблем XXI века. – 2016. – № 4. – С. 258-261.
59. Пономарев, А.Я. Влияние физико-химических свойств элементов и условий природной среды на миграцию загрязнений / А.Я. Пономарев, А.Н. Манвелов, В.И. Шмырев, Д.В. Шмырев // Человеческий капитал. – 2015. – № 11-12 (83-84). – С. 40-44.
60. Кармазин, В.Н. Об идентификации источников аварийных выбросов загрязнений в атмосферу / В.Н. Кармазин, В.Н. Лебединцев, А.В. Кармазин // Наука Кубани. – 2008. – № 3. – С. 4-7.
61. Махотлова, М.Ш. Критерии оптимизации взаимоотношения человека с природой / М.Ш. Махотлова, М.Х. Ахматова // Молодой ученый. – 2015. – № 21 (101). – С. 57-59.
62. Сазонов, Э.В. Научно-методические основы мероприятий по охране атмосферы городов от загрязнений / Э.В. Сазонов // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Физико-химические проблемы и высокие технологии строительного материаловедения. – 2008. – № 1. – С. 126-133.

63. Костарев, С.Н. Численное моделирование процесса рассеивания загрязнений в атмосфере / С.Н. Костарев, Т.Г. Серeda, Е.Н. Еланцева // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Безопасность и управление рисками. –2016. –2016. – № 4. – С. 88-107.
64. Исидоров, В.А. Экологическая химия: Учебное пособие для вузов. / В.А. Исидоров – СПб: Химиздат, 2001. – 304 с.
65. Сазонов, Э.В. Охрана атмосферы городских поселений от загрязнений / Э.В. Сазонов // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. – 2011. – № 1. – С. 61-68.
66. Самуленков, Д.А. К вопросу о мониторинге атмосферных загрязнений / Д.А. Самуленков, И.Н. Мельникова, М.В. Сапунов // Региональная экология. – 2015. – № 2 (37). – С. 44-52.
67. Shi, X. Research on regional environmental pollution analysis technology based on atmospheric numerical model in Shenyang city / X. Shi, Y. Ma, Q. Wang, K. Gao, X. Liu // Communications in Computer and Information Science. – 2016. – Vol. 569, P. 751-759.
68. Barna, M.G. Modeling regional sulfate during the BRAVO study: Part 2. Emission sensitivity simulations and source apportionment / M.G. Barna, B.A. Schichtel , K.A. Gebhart, W.C.Malm // Atmospheric Environment. – 2006. – Vol. 40 (14). – P. 2423-2435.
69. Kumar, A. Evaluation of control strategies for industrial air pollution sources using American Meteorological Society/Environmental Protection Agency Regulatory Model with simulated meteorology by Weather Research and Forecasting Model / A. Kumar, R.S. Patil, A.K. Dikshit, S. Islam, R. Kumar // Journal of Cleaner Production. – 2016. – Vol. 116. – P. 110-117.
70. Perry, S.G. Characterization of pollutant dispersion near elongated buildings based on wind tunnel simulations / S.G.Perry, D.K. Heist, L.H. Brouwer, E.M. Monbureau, L.A. Brixey // Atmospheric Environment. – 2016. – Vol. 142. – P. 286-295.

71. Jittra, N. Performance evaluation of AERMOD and CALPUFF air dispersion models in industrial complex area / N. Jittra, N. Pinthong, S. Thepanondh // *Air, Soil and Water Research*. – 2015. – Vol. 8. – P. 87-95.
72. Levy, J.I. Using CALPUFF to evaluate the impacts of power plant emissions in Illinois: mode sensitivity and implications / J.I. Levy, J.D. Spengler, D. Hlinka, D. Sullivan, D. Moon // *Atmospheric Environment*. – 2002. – Vol. 36(6). – P. 1063-1075.
73. Ogneva-Himmelberger, Y. CALPUFF and CAFOs: Air pollution modeling and environmental justice analysis in the North Carolina HOG Industry / Y. Ogneva-Himmelberger, L. Huang, H. Xin // *ISPRS International Journal of Geo-Information*. – 2015. – Vol. 4 (1). – P. 150-171.
74. Protonotariou, A. Evaluation of CALPUFF modelling system performance: An application over the Greater Athens Area, Greece / A. Protonotariou, E. Bossioli, E. Athanasopoulou, C.G. Helmis, V.D. Assimakopoulos // *International Journal of Environment and Pollution*. – 2005. – Vol. 24 (1-4). – P. 22-35.
75. Zhou, Y. Estimating population exposure to power plant emissions using CALPUFF: a case study in Beijing, China / Y. Zhou, J.I. Levy, J.K. Hammitt, J.S. Evans. – 200. – Vol. 37(6). – P. 815-826.
76. Barna, M.G. Modeling regional sulfate during the BRAVO study: Part 1. Base emissions simulation and performance evaluation / M.G. Barna, K.A. Gebhart, B.A. Schichtel, W.C. Malm // *Atmospheric Environment*. – 2006. – Vol. 40 (14). – P. 2436-2448.
77. Michanowicz, D.R. A hybrid land use regression/line-source dispersion model for predicting intra-urban NO₂ / D.R. Michanowicz, J.L.C. Shmool, L. Cambal, K. Naumoff Shields, J.E. Clougherty // *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. – 2016. – Vol. 43. – P. 181-191.
78. Perry, S.G. CTDMPPLUS: a dispersion model for sources near complex topography. Part I: technical formulations / Perry, S.G. // *Journal of Applied Meteorology*. – 1992. – Vol. 31 (7). – P. 633-645.

79. Paumier, J.O. CTDMPLUS: a dispersion model for sources near complex topogprahy. Part II: performance characteristics / J.O. Paumier, S.G. Perry, D.J. Burns // *Journal of Applied Meteorology*. – 1992. – Vol. 31 (7). – P. 646-660.
80. Chen, Q. Establishment of method for health risk assessment of pollut ants from fixed sources / Q. Chen, H.-B. Wu // *Huanjing Kexue / Environmental Science*. – 2016. – Vol. 37 (5). – P. 1646-1652.
81. Athanasopoulou, E. Modelling of aerosol in the Greater Athens Area, Greece / E. Athanasopoulou, E. Bossioli, M. Tombrou // *International Journal of Environment and Pollution*. – 2005. – Vol. 24 (1-4). – P. 230-246.
82. Thepanondh, S. Evaluation of dispersion model performance in predicting SO₂ concentrations from petroleum refinery complex / S. Thepanondh, P. Outapa, S. Saikomol // *International Journal of GEOMATE*. – 2016. – Vol. 11 (1). – P. 2129-2135.
83. Сухинов, А. И. Математическая модель распространения примеси в приземном слое атмосферы и ее программная реализация на многопроцессорной вычислительной системе / А.И. Сухинов, Д. С. Хачунц, А.Е. Чистяков // *Вестник УГАТУ*. – 2015. – № 1 (67) – Т. 19. – С. 213-223.
84. Decanini, E. Application of REMSAD and GAMES modelling systems on a particulate matter and ozone episode in Milan metropolitan area / E. Decanini, M. Pola, F. Polla Mattiot, M. Volta // *International Journal of Environment and Pollution*. – 2003. – Vol. 20(1-6). – P. 230-241
85. Беликов, Д.А. Численная модель турбулентного переноса примеси в пограничном слое атмосферы / Д.А. Беликов, А.В. Старченко // *Оптика атмосферы и океана*. – 2007. – Т. 20. – № 8. – С. 667-673.
86. Иванов, П.Л. Пакет программ для термодинамического расчета газофазных химических реакций / П.Л. Иванов, Н.П. Гузаирова, Р.Г. Иванова, Е.И. Кущевая // *Башкирский химический журнал*. – 2006. – Т. 13. – № 3. – С. 96.
87. Каракеян, В.И. Оценка риска здоровью взрослого населения от загрязнения атмосферы химическими соединениями / В.И. Каракеян, С.А. Чернявский // *Экология урбанизированных территорий*. – 2015. – № 2. – С. 59-63.

88. Беликов, Д.А. Численное исследование образования вторичных загрязнителей воздуха вблизи индустриального центра / Д.А. Беликов, А.В. Старченко // Вычислительные технологии. – 2005. – Т. 10. – № S3. – С. 99-105.
89. Каракеян, В.И. Исследование процесса распространения первичных и вторичных загрязнителей в атмосфере, содержащих серу и азот / В.И. Каракеян, С.А. Чернявский // Экология промышленного производства. – 2013. – № 3 (83). – С. 21-25.
90. Чернявский, С.А. Исследование валовых выбросов вторичных загрязнителей в атмосферу г. Зеленограда как практическая задача контроля качества атмосферного воздуха / С.А. Чернявский, В.И. Каракеян // Технические науки - от теории к практике. – 2014. – № 36. – С. 6-16.
91. Беликов, Д.А. Исследование образования вторичных загрязнителей (озона) в атмосфере г. Томска / Д.А. Беликов, А.В. Старченко // Оптика атмосферы и океана. – 2005. – Т. 18. – № 5-6. – С. 435-443.
92. Барт, А.А. Математическая модель для прогноза качества воздуха в городе с использованием суперкомпьютеров / А.А. Барт, Д.А. Беликов, А.В. Старченко // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. – 2011. – № 3. – С. 15-24.
93. Барт, А.А. Информационно-вычислительная система для краткосрочного прогноза качества воздуха над территорией г. Томска / А.А. Барт, А.В. Старченко, А.З. Фазлиев // Оптика атмосферы и океана. – 2012. – Т. 25. – № 7. – С. 594-601.
94. Каракеян, В.И. Физико-химическое моделирование трансформаций антропогенных выбросов в приземном слое атмосферы / В.И. Каракеян, С.А. Чернявский // Экология промышленного производства. – 2015. – № 2 (90). – С. 27-30.
95. Ильченко, И.А. Исследование первичного и вторичного загрязнения воздуха промышленных городов и путей его снижения / И.А. Ильченко // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки. – 2009. – № 6. – С. 79-83.

96. Звягинцев, А.М. Изменчивость концентраций основных загрязнителей воздуха в лондоне / А.М. Звягинцев, И.Н. Кузнецова, О.А. Тарасова, И.Ю. Шалыгина // Оптика атмосферы и океана. – 2014. – Т. 27. – № 5. – С. 424-434.
97. Каракеян, В.И. Распространение вторичных примесей в атмосфере как фактора влияния при построении системы мониторинга / В.И. Каракеян, С.А. Чернявский // Оборонный комплекс - научно-техническому прогрессу России. – 2013. – № 2. – С. 40-44.
98. Чернявский, С.А. Образование и трансформация первичных и вторичных атмосферных загрязнителей на примере соединений серы и азота, как важная задача мониторинга атмосферного воздуха / С.А. Чернявский // Технические науки - от теории к практике. – 2013. – № 18. – С. 188-198.
99. Чернявский, С.А. Расчёт концентраций вторичных загрязнителей в атмосфере на примере соединений азота и серы / С.А. Чернявский, В.И. Каракеян // Технические науки - от теории к практике. – 2013. – № 29. – С. 195-202.
100. Вишнякова, К.В. Анализ воздействия атмосферных факторов на распространение газовых выбросов с целью прогноза степени риска в зоне влияния металлургического предприятия: дис. канд. техн. наук: 05.16.07 / Вишнякова Кира Викторовна.- М., 2011.- 153 с.
101. ОНД 86. Методика расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий. – Л.: Гидрометеиздат, 1987. – 93 с.
102. Социальный отчет за 2012 год [Электронный ресурс] // Открытое акционерное общество «Магнитогорский металлургический комбинат». – Режим доступа: http://mmk.ru/about/responsibility/social_report/.
103. Научно-прикладной справочник «Климат России» [Электронный ресурс] // ФГБУ "ВНИИГМИ-МЦД". – 2011. – Режим доступа: <http://aisori.meteo.ru/ClspR>.
104. Социальный отчет за 2011 год [Электронный ресурс] // Открытое акционерное общество «Магнитогорский металлургический комбинат». – Режим доступа: http://mmk.ru/about/responsibility/social_report/.

105. Социальный отчет за 2013 год [Электронный ресурс] // Открытое акционерное общество «Магнитогорский металлургический комбинат». – Режим доступа: http://mmk.ru/about/responsibility/social_report/.
106. Социальный отчет за 2014 год [Электронный ресурс] // ПАО «Северсталь». – Режим доступа: <http://www.severstal.com/rus/csr/library/reports/>.
107. Социальный отчет за 2008 год [Электронный ресурс] // Открытое акционерное общество «Новолипецкий металлургический комбинат». – Режим доступа: <http://nlmk.com/ru/responsibility/social-responsibility/reports-and-publications/>.
108. Добросельский, К.Г. Методика оценки распространения газообразных примесей от тепловых источников / К.Г. Добросельский // Известия Томского политехнического университета. – 2014. – № 2, Т. 324, С. 78-83.
109. Еремина, И.Д. Кислотность и химический состав осадков на территории московского региона в теплый период года / И.Д. Еремина, Н.Е. Чубарова, Л.И. Алексеева, Г.В. Суркова // Вестник Московского университета. Серия 5: География. – 2014. – № 5. – С. 3-11.

Приложение А. Модели распространения выбросов

Модели, разработанные в США

BLP это гауссова модель дисперсии шлейфа, предназначенная для обработки уникальных задач моделирования, связанных с заводами по производству алюминия, однако может использоваться и для других промышленных источников, где подъем шлейфа и эффекты скоса потока имеют особое значение.

OCD - модель, основанная на гауссовом распределении разработанная для определения воздействия морских выбросов из точечных, линейных или площадных источников на качество воздуха в прибрежных районах. OCD включает распространение шлейфа над водой и дисперсию, а также изменения, которые происходят, когда шлейф пересекает береговую линию. В качестве исходных данных необходимы почасовые метеорологические данные с моря и берега.

ADAM представляет собой модифицированную box-модель и гауссову модель дисперсии, которая включает в себя термодинамику, химию, теплопередачу, аэрозольную нагрузку и эффект тяжелого газа. Сценарии высвобождения включают в себя непрерывное и мгновенное, под давлением и без давления, источники: точечные и площадные, варианты жидкости или пара.

ASPEN - система состоит из модуль дисперсии и картографического модуля. Модуль дисперсии представляет собой гауссову модель, основанную на ISCST3, предназначенную для оценки среднегодовых концентраций в окружающей среде при наборе фиксированных рецепторов в непосредственной близости от источника излучения. Картографический модуль обеспечивает концентрацию в каждой точке местности. Входные данные - это данные о выбросах, метеорологические данные и данные местности.

DEGADIS представляет собой модель, которая имитирует дисперсию тяжелых газов или аэрозолей на уровне земли от площадных источников, выпущенных с нулевым импульсом в атмосферу над плоской ровной местностью. Модель описывает дисперсионные процессы, которые сопровождают шлейф тяжелого газа перемещающегося в пограничном слое.

HGSYSTEM - представляет собой набор компьютерных программ, предназначенных для долгосрочного прогнозирования и прогнозирования рассеивания случайных выбросов химических веществ с акцентом на тяжелый газ.

HOTMAC и RAPTAD - HOTMAC представляет собой модель для прогнозирования погоды, используется в сочетании с RAPTAD, которая представляет собой слоеную модель для расчета транспортировки и рассеивания загрязняющих веществ. Эти модели используются для сложного рельефа местности, в прибрежных районах, городских районах.

AFTOX - гауссова модель дисперсии, которая обрабатывает непрерывные или мгновенные выбросы жидкости или газа от возвышенных или приземных точечных или площадных источников. Выходные данные представляют собой концентрации изополей, концентрации в определенном месте, и максимальные концентрации при заданной высоте и времени.

PANACHE – основана на модели Эйлера (и Лагранжа для твердых частиц), 3-мерная модель, предназначенная для моделирования непрерывного и краткосрочного рассеивания загрязняющих веществ в атмосфере в простом или сложном рельефе.

SCIPUFF - слоеная модель дисперсии, которая использует гауссово распределение для прогнозирования трехмерных, зависящих от времени концентраций загрязняющих веществ. В дополнение к среднему значению концентрации, SCIPUFF предсказывает статистическую дисперсию концентрации в результате случайных флуктуаций ветра.

SDM - представляет собой гауссову модель дисперсии, используется для определения концентрации в приземных слоях от высоких стационарных точечных источников вблизи береговой линии.

SLAB - модель для плотных газообразных выбросов, использующая одномерное уравнение движения, сохранения массы и энергии, а также уравнение состояния.

Модели, разработанные в Соединенном Королевстве

ADMS-URBAN предназначена для моделирования дисперсии от локального до регионального масштаба. Используется для оценки текущего и прогнозного качества воздуха в сравнении с национальными стандартами в Европе и в других местах.

GASTAR - модель для имитации случайных выбросов более тяжелых горючих и токсичных газов. Обрабатывает мгновенные и непрерывные выбросы из точечных источников, выбросы в результате испарений летучих жидких веществ, с учетом шероховатости поверхности, препятствий.

UDM является гауссовой слоеной моделью для прогнозирования дисперсии загрязняющих веществ в атмосфере в пределах от 10 м до 25 км. Обрабатывает мгновенные, непрерывные источники газов, твердых частиц и жидкостей.

Модели, разработанные в континентальной Европе

AEROPOL (Эстония) - модель загрязнения окружающей среды, разработанная на основе гауссовой модели, предназначена для моделирования дисперсии непрерывных, плавучих шлейфов от стационарных точечных, линейных и площадных источников над плоской местностью в региональном масштабе.

Airviro Gauss (Швеция) - гауссова модель дисперсии, которая обрабатывает точечные, линейные и площадные источники. Шлейф следует траектории ветра и ограничивается в зависимости от скорости ветра.

Airviro Heavy Gas (Швеция) - модель дисперсии тяжелых газов.

AUSTAL2000 (Германия) - официальная модель дисперсии воздуха для использования при выдаче разрешений для промышленных источников Немецким Федеральным Агентством по Окружающей Среде. Модель использует точечный, линейный, площадный или объемный источник, имеет возможность для построения сложного рельефа местности, учитывает влажное или сухое осаждение и первый порядок химических реакций.

BUO-FMI (Финляндия) - модель была разработана специально для оценки атмосферной дисперсии нейтральных или плавучих шлейфов газов и частиц, испускаемых от пожаров на химических складах.

DIPSCOT (Греция) – модель имитирует дисперсию плавучего шлейфа из нескольких точечных источников на сложной местности в локальном и региональном масштабе, не учитывает мокрое осаждение или химические реакции.

DISPLAY-2 (Греция) - дисперсионная модель облака пара для нейтральных или плотных шлейфов загрязнения на сложной местности в локальном масштабе, включает возможность реактивных выбросов.

EK100W (Польша) – гауссова модель, используется для оценки качества воздуха при воздействии загрязнителей из промышленных точечных источников, а также для городских исследований качества воздуха на местном уровне. Она включает в себя мокрое и сухое осаждения. Рельеф местности не учитывается.

GRAL (Австрия) - Лагранжева модель, представляет собой модель дисперсии плавучего шлейфа из нескольких точечных или линейных источников. Обрабатывает плоский или сложный рельеф местности, но не учитывает осаждение и химические реакции.

HAVAR (Чехия) - гауссова модель шлейфа, предназначена для обычных или аварийных выбросов радионуклидов из отдельных точечных источников в пределах атомных электростанций.

IFDM (Бельгия) - гауссова модель дисперсии, используется для точечных и площадных источников рассеивающих выбросы над плоской местностью, предназначена для локального масштаба. Модель включает в себя истощение шлейфа путем сухого или мокрого осаждения. Она не предназначена для сложного рельефа местности и химически активных загрязнителей.

LOTOS-EUROS (Нидерланды) - предназначена для моделирования рассеивания загрязняющих веществ по всей Европе. Она включает в себя простые химические реакции, а также мокрое и сухое осаждение.

MATCH (Швеция) – мульти-масштабная трехмерная модель атмосферного переноса и химии, основанная на модели Эйлера модель, подходит от городского до глобального масштаба.

MODIM (Словацкая Республика) - модель для расчета дисперсии непрерывных, нейтральных или плавучих шлейфов в локальном и региональном масштабе. Интегрированная гауссова модель факела для одного или нескольких точечных и площадных источников с численной моделью для линейных источников.

MSS (Франция) - представляет собой модель Лагранжа, используется для прогнозирования переноса и рассеивания загрязняющих веществ в городских условиях.

MUSE (Греция) - Фотохимическая модель атмосферной дисперсии, предназначена для изучения образования фотохимического смога в городских районах и оценки стратегий управления на местном и региональном масштабе. Она может имитировать сухое осаждение и трансформацию загрязняющих веществ с использованием любого подходящего механизма химической реакции.

OML (Дания) - модель для дисперсионных расчетов непрерывных нейтральных или плавучих шлейфов от одного или нескольких стационарных точечных и площадных источников. Она имеет некоторые простые методы для

обработки фотохимии (в первую очередь для NO_2) и для обработки сложной местности.

ONM9440 (Австрия) - гауссова модель дисперсии для непрерывных плавучих шлейфов от стационарных источников для использования на плоских участках местности. Она включает в себя истощение шлейфа путем сухого осаждения твердых частиц.

PLUME (Болгария) - традиционная гауссова модель факела, используется во многих нормативных приложениях. Основой модели является одна простая формула, которая предполагает постоянную скорость ветра и отражение от поверхности земли.

RADM (Франция) - моделирует газовые шлейфы (в том числе загрязняющих веществ с экспоненциальным затуханием скорости образования) из одного или нескольких стационарных или мобильных источников. Учитываются химические реакции, радиоактивный распад, осаждение, сложный рельеф местности.

RIMPUFF (Дания) - оперативная аварийная модель реагирования, используется для оказания помощи организациям в чрезвычайных ситуациях, имеющих дело с химическими, биологическими и радиационными выбросами в атмосферу.

SAFE AIR II (Италия) - моделирование рассеивания загрязнителей воздуха над сложным рельефом в местном и региональном масштабах. Может обрабатывать выбросы от точечных, линейных, площадных и объемных источников. Включает в себя химические реакции первого порядка и истощение шлейфа путем мокрого и сухого осаждения, но не включает фотохимию.

Sevex (Бельгия) - имитирует случайное высвобождение токсичных и/или легковоспламеняющихся веществ над плоской или сложной местностью из нескольких труб. Интегрированная модель может работать с плотными газами.

STOER.LAG (Германия) - модель дисперсии, предназначена для оценки случайных выбросов опасных и/или горючих веществ из точечных или

площадных источников на промышленных предприятиях. Модель учитывает застройку и рельеф местности.

UDM-FMI (Финляндия) - интегрированная гауссова модель, предназначенной для контроля загрязнения города. Она обрабатывает несколько источников различного масштаба и включает в себя химическое преобразование (для NO_2), мокрое и сухое осаждение (для SO_2).

Модели, разработанные в Австралии

LADM - усовершенствованная модель для моделирования дисперсии плавучего шлейфа и прогнозирования фотохимического образования смога над сложным рельефом в локальном и региональном масштабе.

TAPM - усовершенствованная модель дисперсии, включает предварительную обработку для обеспечения входных метеорологических данных. Она может обрабатывать несколько загрязняющих веществ от различных источников в местном, городском или районном масштабе; включает истощение шлейфа путем осаждения и фотохимии.

DISPMOD - гауссова модель атмосферной дисперсии для точечных источников, расположенных в прибрежных районах.

AUSPUFF – гауссова модель, включает в себя некоторые простые алгоритмы для химического превращения химически активных загрязнителей воздуха.

Модели, разработанные в Канаде

MLCD – Лагранжева модель атмосферной дисперсии и осаждения, предназначена для оценки концентрации воздуха и осаждения загрязняющих веществ в не более 10 км от источника.