



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение

высшего образования

**«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Кафедра МКОА

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(бакалаврская работа)

На тему: «Комплексная оценка загрязнения атмосферного воздуха на
территориях мегаполисов России по результатам моделирования ENVIRO-
HIRLAM»

Исполнитель _____ Хусейн Сальма Хишамовна
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель _____ Кандидат физико-математических наук, доцент
(ученая степень, ученое звание)

_____ Мханна Ааед Исмаил Назир
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»

И. о. заведующего кафедрой

_____ (подпись)

_____ Кандидат физико-математических наук, доцент
(ученая степень, ученое звание)

_____ Сероухова Ольга Станиславовна
(фамилия, имя, отчество)

«03 » июня 2023 г.

Санкт-Петербург

2023

СОДЕРЖАНИЕ

СОКРАЩЕНИЯ	4
ВВЕДЕНИЕ	5
ГЛАВА 1. ФИЗИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ТЕРРИТОРИИ МЕГАПОЛИСОВ РОССИИ (САНКТ-ПЕТЕРБУРГ - МОСКВА).	8
1.1. Климатические условия Санкт-Петербурга	9
1.2. Температура воздуха над Санкт-Петербургом	10
1.3. Влажность в Санкт-Петербурге	13
1.4. Осадки в Санкт-Петербурге.....	14
1.5. Атмосферное давление в Санкт-Петербурге	16
1.6. Скорость ветра в Санкт-Петербурге	18
1.7. Климатические условия Москвы	21
1.8. Температура воздуха над Москвой.....	22
1.9. Влажность в Москве.....	27
1.10. Осадки в Москве	27
1.11. Атмосферное давление в Москве.....	30
1.12. Скорость ветра в Москве	32
ГЛАВА 2. СОСТОЯНИЕ КАЧЕСТВА АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА НАД ТЕРРИТОРИЯМИ МЕГАПОЛИСОВ РОССИИ.....	37
2.1. Характеристики, определяющие качество атмосферного воздуха.....	37
2.2. Источники загрязнения атмосферы.	39
2.3. Основные загрязнители атмосферного воздуха в мегаполисах и их воздействие на окружающую среду.	41
2.4. Предельно допустимые концентрации и комплексные показатели загрязненности атмосферы.	43
2.5. Влияние метеорологических условий на качество атмосферного воздуха.	45
2.6. Состояние качества атмосферного воздуха над территориями Санкт- Петербурга и Москвы.....	50
ГЛАВА 3. МОДЕЛЬ ENVIRO-HIRLAM.	54
3.1. История создания модели Enviro-HIRLAM	54
3.2. Структура модели	56
3.3. Процесс моделирования.....	61

ГЛАВА 4. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА НА ТЕРРИТОРИЯХ МЕГАПОЛИСОВ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ.	65
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	79
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	81
ПРИЛОЖЕНИЕ А.....	81
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	91
ПРИЛОЖЕНИЕ В.....	95

СОКРАЩЕНИЯ

ВОЗ – Всемирная организация здравоохранения

ЛОС – летучие органические соединения

O₃ – озон

ОДУ – обыкновенные дифференциальные уравнения

ПДК – предельно допустимые концентрации

ППС – планетарный пограничный слой

СО – угарный газ

ТЧ – твердые частицы

ЧПП - Численное прогнозирование погоды

ЧУ – черный углерод

AQI – индекс качества воздуха

DMS – диметилсульфид

EQI – индекс качества окружающей среды

LW – длинноволновые

NO_x – оксид азота

SO₂ – диоксид серы

SW – коротковолновые

ВВЕДЕНИЕ

Загрязнение воздуха - это загрязнение воздуха вредными и токсичными веществами, включая газы, частицы и биологические молекулы, которые могут нанести вред здоровью человека и окружающей среде. Источники загрязнения воздуха разнообразны, включая промышленную деятельность, транспорт, сжигание ископаемого топлива, природные явления, такие как лесные пожары, и сельскохозяйственные методы.

Твердые частицы, такие как пыль и дым, и газы, такие как угарный газ и диоксид серы, могут иметь серьезные последствия для здоровья человека, включая респираторные и сердечно-сосудистые заболевания, рак и преждевременную смерть. Загрязнение воздуха также влияет на окружающую среду, нанося ущерб сельскохозяйственным культурам, лесам и экосистемам, вызывая кислотные дожди и глобальное изменение климата.

Для борьбы с загрязнением воздуха во всем мире принимаются различные меры, включая регулирование выбросов, использование более чистых технологий и продвижение устойчивых практик. Люди также могут предпринимать индивидуальные шаги по снижению загрязнения воздуха, пользуясь общественным транспортом, сокращая потребление энергии и избегая сжигания отходов.

Одной из главных проблем, с которыми сталкиваются современные мегаполисы, является загрязнение окружающей среды, в частности, атмосферы. Крупнейшие города России, такие как Москва и Санкт-Петербург, не являются исключением. На протяжении последних десятилетий уровень загрязнения атмосферы в данных городах постоянно растет, что ведет к серьезным последствиям для здоровья жителей и экологической ситуации в целом.

В связи с этим, **актуальность** изучения комплексной оценки загрязнения атмосферы Санкт-Петербурга и Москвы неоспорима. Это позволяет выявлять основные источники загрязнения и разрабатывать меры по их снижению, а также оценивать эффективность уже реализованных мероприятий. Кроме того,

комплексная оценка загрязнения атмосферы позволяет внести научный вклад в решение актуальных экологических проблем, что является важным вкладом в развитие экологической науки в целом.

Одним из основных вопросов, которые решает комплексная оценка загрязнения атмосферы, является оценка уровня антропогенного воздействия на окружающую среду. Эта оценка включает в себя исследование концентрации вредных веществ в атмосферном воздухе, которые негативно влияют на здоровье людей и животных, разрушают экологическую баланс и ухудшают качество жизни в городе.

Таким образом, изучение комплексной оценки загрязнения атмосферы Санкт-Петербурга и Москвы является актуальной и важной задачей, которая позволяет возможность уменьшения антропогенного воздействия на окружающую среду и сохранения здоровья жителей городов.

Целью настоящего дипломного проекта является исследование и систематизация информации о комплексной оценке загрязнения атмосферы в городах Санкт-Петербург и Москва. В связи с растущим количеством проблем, связанных с экологическими аспектами жизни в этих городах, необходимо выработать эффективные меры по снижению уровня загрязнения воздуха. Для достижения этой цели в работе были поставлены следующие задачи:

1. Провести анализ существующих методов оценки качества атмосферного воздуха;
2. Выбрать наиболее оптимальные для исследования конкретных зон Санкт-Петербурга и Москвы;
3. Произвести обработку полученной информации и выделить основные источники выбросов вредных веществ в городах;
4. Провести комплексную оценку загрязнения атмосферы Санкт-Петербурга и Москвы по результатам моделирования.

Для решения поставленных задач были использованы следующие материалы:

Результаты моделирования ENVIRO-HIRLAM, архивы спутниковых и синоптических данных, а также анализ изменения климатических данных за период 2010-2022 годы;

Представляемая бакалаврская работа состоит из введения, 4 глав, заключения, приложения. Текст содержит 63 рисунка и 16 таблиц. Список использованной литературы насчитывает 62 наименования.

ГЛАВА 1. ФИЗИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ТЕРРИТОРИИ МЕГАПОЛИСОВ РОССИИ (САНКТ-ПЕТЕРБУРГ - МОСКВА).

Санкт-Петербург - это город, расположенный в северо-западном регионе России, на берегу Финского залива. Его географические особенности - это, прежде всего, водные пути и каналы, которые проходят через весь город. В Санкт-Петербурге насчитывается 65 рек и каналов, поэтому в весенне-осенний период здесь часто случаются наводнения. Площадь города составляет 1439,7 квадратных километров, а население - более 5 миллионов человек, что делает его вторым по величине городом России. [1]

В последнее время Санкт-Петербург борется с проблемой загрязнения воздуха. Выбросы, производимые автомобилями, промышленными предприятиями и электростанциями, привели к ухудшению качества воздуха до опасного уровня. Всемирная организация здравоохранения включила Санкт-Петербург в список городов Российской Федерации с наихудшим качеством воздуха. [2]

Москва - столица и крупнейший город России, расположенный в центральной части страны. Она является политическим, экономическим, культурным и научным центром России, а также глобальным городом и крупным туристическим центром. Москва расположена на берегах Москвы-реки, которая протекает через весь город и служит естественным разделителем между восточной и западной частями. Рельеф города разнообразный, с холмами и долинами, около пятой части города занимают леса и зеленые зоны, включая парки и сады.

В Москве влажный континентальный климат, характеризующийся холодной, продолжительной и снежной зимой и мягким или теплым летом.

Москва расположена на восточной стороне Европы, в европейской части России. Город находится примерно в 800 км к востоку от Санкт-Петербурга.

Москва известна своим загрязнением воздуха, особенно в зимние месяцы, когда использование систем отопления и распространенность дровяных печей способствуют выбросу таких загрязняющих веществ, как мелкие твердые частицы (PM2.5) и диоксид азота (NO2).

Согласно докладу Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ) за 2018 год, Москва занимает 14-е место среди самых загрязненных городов мира по концентрации PM2.5 со среднегодовым показателем 22 мкг/м³. Кроме того, в 2016 году город 176 дней превышал нормативы ВОЗ по концентрации PM2.5 на уровне 10 мкг/м³. [3,4]

Предпринимаются усилия по улучшению качества воздуха в Москве, включая внедрение более чистых видов топлива, замену устаревших систем отопления, а также поощрение общественного транспорта и велосипедного движения. Однако для устранения коренных причин загрязнения воздуха в городе необходимо проделать еще большую работу.[5]

1.1. Климатические условия Санкт-Петербурга

Климат в городе полуконтинентальный с морским характером. Зима холодная, температура опускается до -20°C - (-30°C), а лето относительно короткое, и пик температуры приходится на 20°C - 25°C. Уровень влажности высок круглый год из-за близости к водным источникам, что приводит к частым дождям в течение всего года. Среднее количество осадков составляет 600 мм и выпадает в основном в виде дождя и снега.

Санкт-Петербург расположен в северо-западной части России, на берегу Финского залива. Город с трех сторон окружен водой, сетью каналов, рек и Финским заливом. [6,7]

Климат в Санкт-Петербурге определяется двумя основными факторами - радиационным режимом и циркуляцией атмосферы. Юго-западные и западные атлантические воздушные массы, которые часто проникают в город, приводят к ветреной пасмурной погоде, в то время как радиационное влияние чаще

проявляется при формировании антициклонов, когда погода ясная и безветренная. [7]

1.2. Температура воздуха над Санкт-Петербургом

За все время измерения температуры воздуха в Санкт-Петербурге, начиная с 1752 года, произошло общее изменение среднегодовой температуры на 2 градуса Цельсия (см. таблицу 1.1). Зимняя средняя температура повысилась на 3,4 градуса Цельсия, а летняя - на 0,5 градуса Цельсия. За последние 30 лет температура воздуха в среднем повысилась на 1,7 градуса Цельсия в год: зимой на 3,5 градуса Цельсия и летом на 1,5 градуса Цельсия (см. таблицу 1.2).

Таблица 1.1 – Температурный режим (значения минимумов и максимумов) за весь период измерения температуры в Санкт-Петербурге

Месяц	Наименьшие значения, °C (год)	Абсолютный минимум, °C (год)	Наибольшие значения, °C(год)	Абсолютный максимум, °C(год)
Январь	-21,4 (1814)	-35,9 (1883)	-0,3 (1925)	8,7 (2007)
Февраль	-19,5 (1799, 1871)	-35,2 (1956)	1,7 (1990)	10,2 (1989)
Март	-11,5 (1942)	-29,9 (1883)	3,6 (2007)	14,9 (2007)
Апрель	-4,5 (1851)	-21,8 (1881)	8,4 (1921)	25,3 (2000)
Май	2,1 (1867)	-6,6 (1885)	16,0 (1897)	30,9 (1958)
Июнь	11,1 (1810)	0,1 (1930)	20,4 (1999)	34,6 (1998)
Июль	14,1 (1832, 1837, 1878)	4,9 (1968)	24,4 (2010)	35,3 (2010)
Август	12,6 (1835, 1856)	1,3 (1966)	19,9 (1972)	37,1 (2010)
Сентябрь	7,0 (1894)	-3,1 (1976)	15,0 (1938)	30,4 (1992)
Октябрь	-0,5 (1880)	-12,9 (1920)	9,3 (1775, 1909)	21,0 (1889)
Ноябрь	-10,0 (1774)	-22,2 (1890)	4,2 (1772)	12,3 (1967)
Декабрь	-18,4 (1788)	-34,4 (1978)	3,0 (2006)	10,9 (2006)

Таблица 1.2 – Значения максимальной и минимальной температуры за период 2000-2022 гг [8]

Месяц	Min T, °C	Max T, °C
январь	-12,1	1,5
февраль	-11	0,6
март	-6,6	3,6
апрель	2,3	8,1
май	9,4	15,1
июнь	13	21,4
июль	16,5	24,4
август	16,1	20,6

Продолжение таблицы 1.2

сентябрь	10,2	14,5
октябрь	1,4	9,1
ноябрь	-2,3	4,4
декабрь	-9,6	3

На рисунках 1.1 и 1.2 представлены графики минимальных и максимальных среднемесячных температур за период 2000-2022 гг.

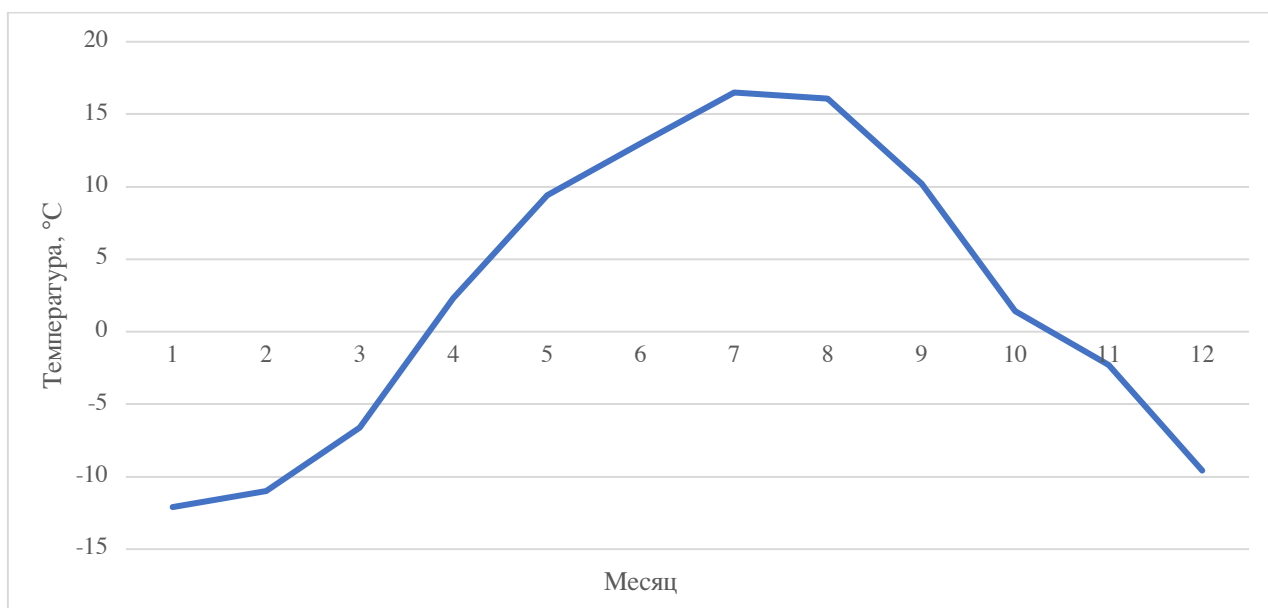


Рисунок 1.1 – Минимальные значения среднемесячной температуры воздуха за период 2000-2022гг

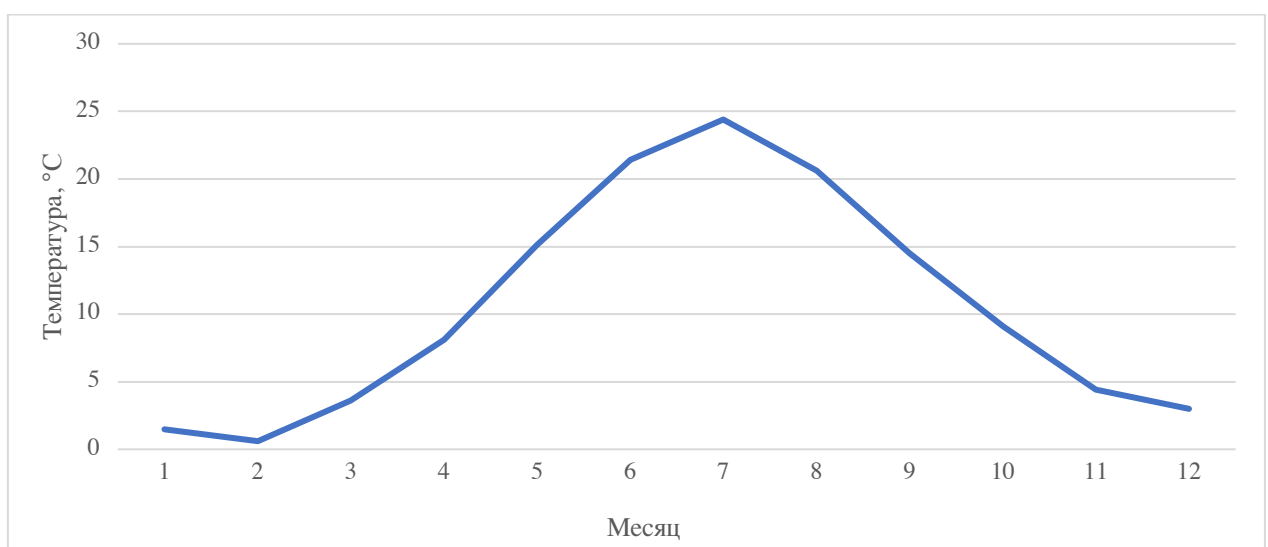


Рисунок 1.2 – Максимальные значения среднемесячной температуры воздуха за период 2000-2022гг

Тренд положительного изменения температуры воздуха в Санкт-Петербурге (см. таблица 1.3 и рисунок 1.3) связан с естественными колебаниями и формированием "городского острова тепла", вызванного выбросами водяного пара, накапливающегося под инверсионными слоями атмосферы. Центр "острова тепла" находится в Центральном и Адмиралтейском районах. Большинство минимальных значений температуры было зафиксировано в XVIII-начале XX веков, а на начало XXI столетия пришлись максимальные значения. Нельзя точно утверждать о катастрофическом повышении температуры в последние десятилетия, так как "городской остров тепла" не существовал в прошлом. [9]

Таблица 1.3 – Средние месячные температуры в Санкт-Петербурге за период 2000-2022 гг

Год	январь	февраль	март	апрель	май	июнь	июль	август	сентябрь	октябрь	ноябрь	декабрь
2000	-4,4	-2,4	-0,4	8,1	10,5	15,4	18,2	16,6	10,6	8,4	2,6	-0,5
2001	-2,5	-6,9	-3,8	8	10,2	15,2	21,8	16,8	12,7	7,1	-1	-8,8
2002	-4,4	-0,6	0,5	6	12,4	16,8	20,8	18,8	11,7	1,4	-2,3	-9,6
2003	-9,5	-5,8	-1,6	2,3	12,1	13	21,4	16,6	12,4	5,1	2,4	-0,8
2004	-8,1	-5,4	-0,5	5	11,1	14,7	18,5	17,8	13,2	6,5	-0,1	-0,7
2005	-1,6	-6,4	-6	4,7	11,1	15,4	20,1	17,9	13,6	7,7	3,5	-3,6
2006	-5,8	-10,7	-5,9	5,4	11,8	17	19,2	18,9	14,2	8,1	1,7	3
2007	-2,4	-10,6	3,6	5,2	12,3	16	18,5	19,6	12,1	7,5	-0,7	0,8
2008	-1,7	-0,2	0,4	7	11	15,1	17,8	16,1	10,7	8,7	3,1	-0,8
2009	-3,5	-3,9	-0,8	4,3	12,1	15	18,2	16,8	13,9	4,6	2,4	-5,1
2010	-12,1	-8,4	-2,4	6,7	13,4	15,5	24,4	19,6	12,3	5,5	0,4	-8,3
2011	-5,8	-11	-1,9	5,7	11	17,7	22,5	17,5	13,1	7,6	3,6	1,9
2012	-4,8	-10,4	-1	4,9	12,7	15,2	19,5	16,3	12,9	6,6	2,9	-7,9
2013	-6,1	-2,6	-6,6	4,2	14,4	19,8	19	18,6	12,1	7,3	4,4	0,9
2014	-7	0	2,2	6,5	13	15	21,2	18,8	13,5	5,2	0,8	-1
2015	-2,7	-0,6	2,6	5,1	11,8	15,9	16,9	18,3	14	5,6	3,1	2,1
2016	-11,2	0	1	6,3	14,7	16,5	19	17,2	12,9	5	-1,8	-1,2
2017	-3,9	-3,5	1,3	2,8	9,4	13,6	16,5	17,4	12,5	5,6	2,3	0,4
2018	-2,9	-7,7	-4,4	6	15,1	16,2	20,9	19,2	14,5	7,3	2,8	-3,2
2019	-6,5	-0,5	0,1	7,3	12,1	18,7	16,6	17	12,2	6,1	1,9	1,8
2020	1,5	0,6	2,2	4,2	10	19,1	17,6	17,2	14,3	9,1	3,9	-0,8
2021	-4,6	-9,2	-0,8	5,6	12,1	21,4	23,1	16,9	10,2	8	2,2	-7,5
2022	-4,1	-1,2	-0,3	4,3	10	17,6	19,9	20,6	10,3	8,1	0,5	-3,2

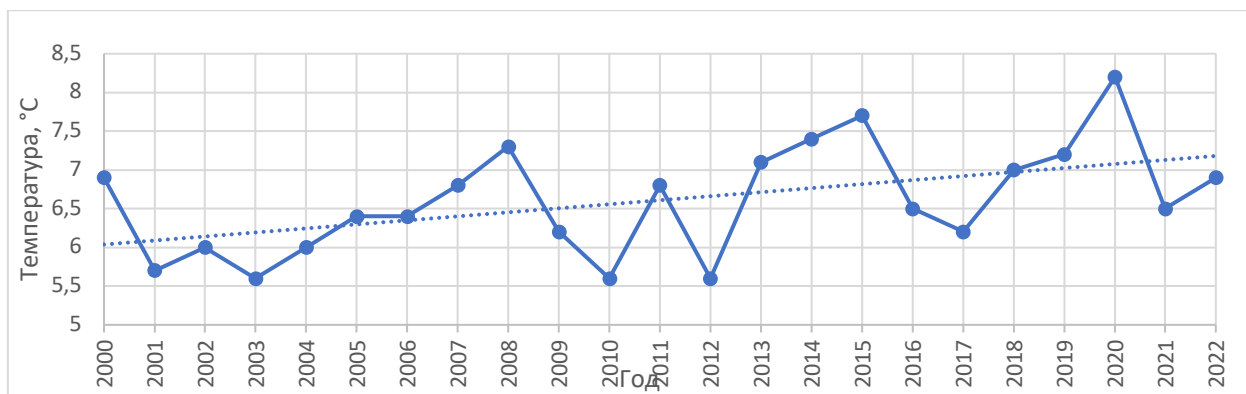


Рисунок 1.3 – Среднегодовые значения температуры воздуха в Санкт-Петербурге за последние 12 лет

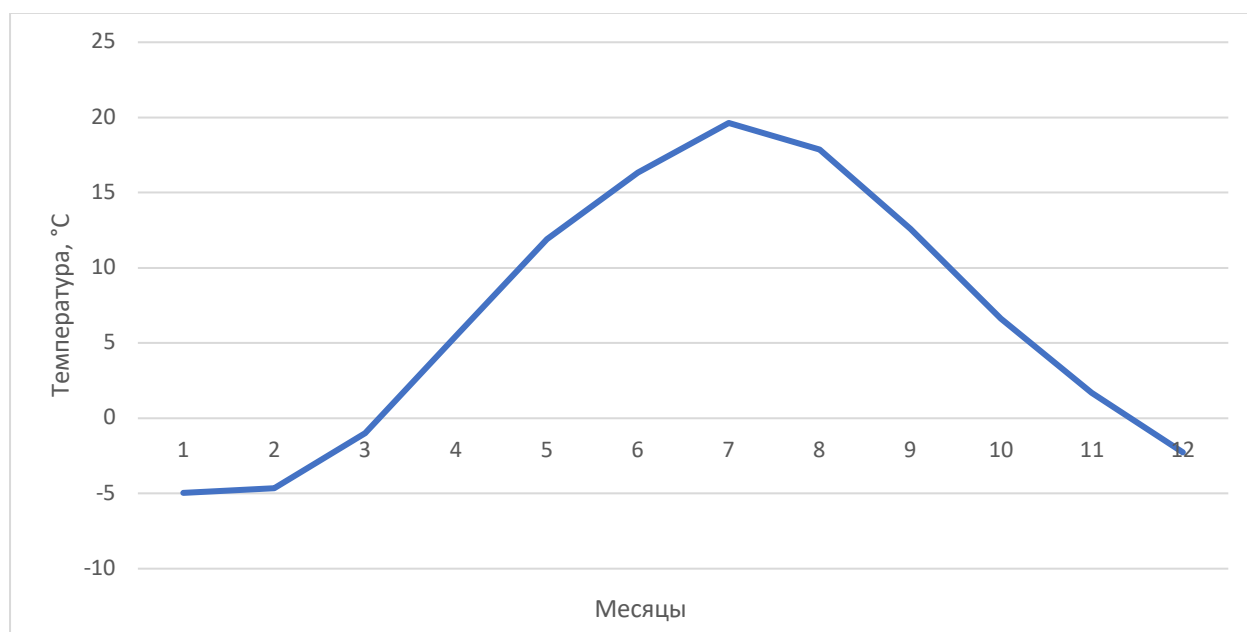


Рисунок 1.4 – Среднемесячные значения температуры в Санкт-Петербурге за период 2000-2022 гг

1.3. Влажность в Санкт-Петербурге

В городе всегда высокая относительная влажность, которая изменяется в течение года. В период с ноября по январь средние показатели относительной влажности наибольшие, так как в это время минимальное количество солнечного тепла и малое испарение. В течение дневных часов от февраля по апрель значения относительной влажности уменьшаются, а в мае достигают минимального уровня. Однако с июня по осень дневные значения постепенно

повышаются. Годовой ход относительной влажности обратен годовому ходу температуры воздуха: с ростом температуры относительная влажность снижается. [9]

1.4. Осадки в Санкт-Петербурге

Поскольку количество выпадающих осадков примерно на 200-250 мм превышает испарение влаги, для Санкт-Петербурга характерна высокая влажность воздуха – около 80% (летом – 60-70%, а зимой – 83-88%). Число дней с относительной влажностью не менее 80% варьирует от 140 до 155.

Из-за своего местоположения Санкт-Петербург находится в зоне избыточного увлажнения. За последние 30 лет среднегодовая сумма осадков в городе составляет 653 и более мм (см. таблицу 1.4), а выпадение осадков зависит от циклонической активности. Неравномерное распределение осадков наблюдается в течение года: 67% выпадает в тёплый период, а 33% – в холодный. Твердые осадки преобладают в декабре-феврале, а жидкие – в мае-октябре. В северной части города и на севере пригородной зоны выпадает больше осадков, чем в центре, на 11% и более чем на 20% соответственно. На побережье Финского залива и на островах выпадает меньше осадков, чем в центре, на 8-9%. В устье Невы количество осадков на 5-7% меньше, чем в центральных районах.

Таблица 1.4 – Месячные и годовые суммы выпавших осадков в Санкт-Петербурге за период 2000-2022 гг

год	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	Общегоодовые
2000	37	19	43	24	35	86	152	64	53	73	68	61	714
2001	27	34	37	54	41	70	119	70	34	78	85	37	685
2002	34	54	39	31	21	75	116	40	52	58	61	31	610
2003	48	24	28	20	127	72	85	159	29	107	57	86	842
2004	30	37	47	8	67	109	83	84	89	40	44	62	699
2005	80	14	25	38	62	72	127	58	25	41	60	49	651

Продолжение таблицы 1.4

2006	25	13	34	31	61	57	17	47	33	98	81	40	537
2007	58	23	37	30	67	88	79	78	39	34	30	23	586
2008	47	63	58	43	19	70	73	77	58	108	57	52	724
2009	42	39	27	29	11	113	63	139	81	96	73	90	801
2010	26	69	58	25	69	108	61	97	58	42	118	81	813
2011	82	48	25	7	56	53	97	69	116	55	29	59	697
2012	43	24	53	54	34	62	66	153	142	68	111	53	861
2013	39	32	10	26	52	37	87	96	55	68	54	53	610
2014	50	41	31	10	93	75	44	102	21	23	42	41	573
2015	68	35	12	62	48	21	87	46	24	26	67	58	555
2016	56	48	20	69	30	97	151	189	30	36	104	36	864
2017	32	34	30	87	13	81	123	145	70	92	34	80	821
2018	41	43	38	57	14	23	96	62	68	26	20	32	519
2019	72	47	53	22	73	23	93	49	52	104	24	86	699
2020	48	48	60	26	25	66	94	107	39	62	42	45	663
2021	35	62	47	23	139	22	50	135	43	73	94	52	777
2022	63	63	14	18	26	47	76	113	67	75	50	67	677
Ср.нормы	1083	914	826	794	1183	1527	2039	2179	1278	1483	1405	1274	

На рисунке 1.5 представлен график среднегодовых сумм выпадения осадков в Санкт-Петербурге за период 2000-2022 гг.

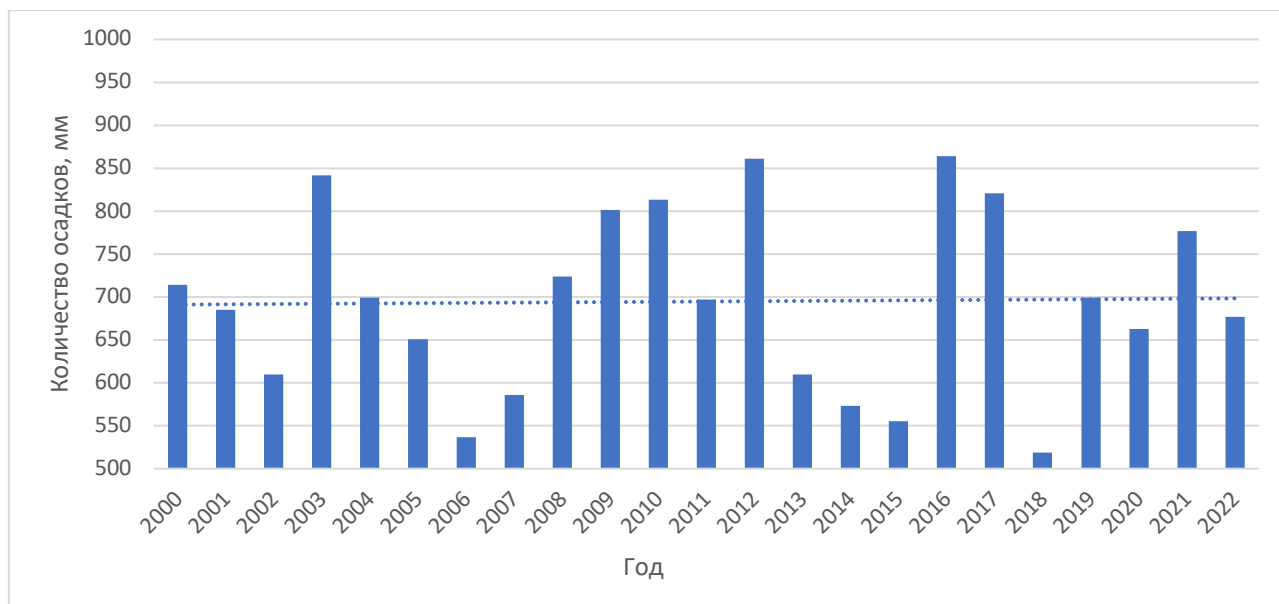


Рисунок 1.5 – Среднегодовые суммы выпадения осадков в Санкт Петербурге за период 2000-2022 гг

Количество дней с осадками $\geq 0,1$ мм варьируется от 155-160 мм на побережье и островах Финского залива до 180-200 мм в центральной и восточной частях города. В целом, количество дней с осадками за период 1936-2006 гг. увеличилось на 7,4 дня, или на 32% от среднего многолетнего значения за этот период.

Одной из основных характеристик осадков является их интенсивность. В холодный период года их интенсивность невелика - в среднем 0,2-0,4 мм/ч. В летние месяцы их интенсивность возрастает до 1,1-1,3 мм/ч из-за обильных осадков (см. таблица 1.5). [9]

Таблица 1.5 – Максимальные и минимальные значения выпадения осадков за весь период измерений в Санкт-Петербурге

Месяц	Норма	Минимум/месяц, мм	Максимум/месяц, мм	Максимум/сутки, мм
Январь	44	4 (1909)	87 (2011)	23 (1955)
Февраль	33	3 (1886)	92 (1990)	13 (1990)
Март	37	0,7 (1923)	83 (1971)	26 (1971)
Апрель	31	6 (1965)	85 (1966)	29 (1991)
Май	46	2 (1978)	127 (2003)	56 (1916)
Июнь	71	8 (1889)	154 (1998)	44 (2004)
Июль	79	5 (1919)	166 (1979)	69 (2002)
Август	83	1 (1955)	191 (1933)	76 (1947)
Сентябрь	64	11 (1901)	178 (1912)	34 (1912)
Октябрь	67	5 (1987)	150 (1984)	37 (2003)
Ноябрь	56	2 (1993)	117 (2010)	31 (2010)
Декабрь	51	7 (1890)	112 (1981)	28 (2009)
за год	662	395 (1882)	842 (2003)	76 (1947)

1.5. Атмосферное давление в Санкт-Петербурге

Термические и динамические факторы влияют на характер изменений атмосферного давления. В Санкт-Петербурге годовой режим атмосферного давления сильно колеблется, особенно в осенне-зимний период, что приводит к большой активности циклонов. Атмосферное давление в городе варьируется от 953.8 до 1064.3 гПа. В летние месяцы давление наименьшее, а в мае - наибольшее, в связи с изменением барического поля атмосферы с зимнего на летний (см. таблицу 1.6 и рисунок 1.6).

Таблица 1.6 – Среднемесячные значения атмосферного давления по Санкт-Петербургу за период 2010-2020 гг [8]

год/мес	январь	февраль	март	апрель	май	июнь	июль	август	сентябрь	октябрь	ноябрь	декабрь
2010	1026,2	1014,6	1006,6	1015,9	1011,9	1011,9	1014,6	1011,9	1014,5	1013,2	1006,6	1013,3
2011	1010,6	1018,6	1014,6	1013,3	1017,2	1013,2	1011,9	1013,3	1009,3	1013,2	1017,2	1001,3
2012	1016,3	1022,1	1011,9	1008,2	1015,8	1009,5	1012,1	1014,5	1009,1	1009,7	1012,2	1018,6
2013	1012,2	1017,5	1016,2	1014,7	1014,8	1014,7	1012,9	1015,8	1012,9	1012,9	1006,7	1008,3
2014	1021,4	1013,8	1011,9	1014,6	1014,5	1011,5	1017,5	1010,2	1018,9	1021,1	1025,3	1008,2
2015	1005,7	1011,5	1020,9	1006,7	1011,7	1012,6	1008,1	1019,8	1018,1	1021,3	1006,9	1010,6
2016	1011,7	1005,8	1014,9	1010,9	1017,3	1012,7	1009,5	1013,7	1015,3	1028,7	1013,3	1010,5
2017	1014,9	1015,8	1010,9	1009,9	1015,9	1006,6	1009,3	1013,3	1018,3	1008,3	1009,9	1004,9
2018	1014,3	1023,3	1011,4	1012,7	1021,7	1010,8	1013,7	1013,5	1012,9	1010,2	1024,8	1017,1
2019	1004,5	1006,4	1003,4	1024,5	1012,5	1012,5	1008,1	1014,9	1012,5	1008,6	1015,5	1004,7
2020	1006,9	998,4	1013,6	1008,4	1013,2	1016,5	1009,8	1013,5	1013,2	1013,9	1017,1	1019,9
Ср. знач	1013,2	1013,4	1012,4	1012,9	1015,1	1012,0	1011,6	1014,0	1014,1	1014,6	1014,1	1010,7

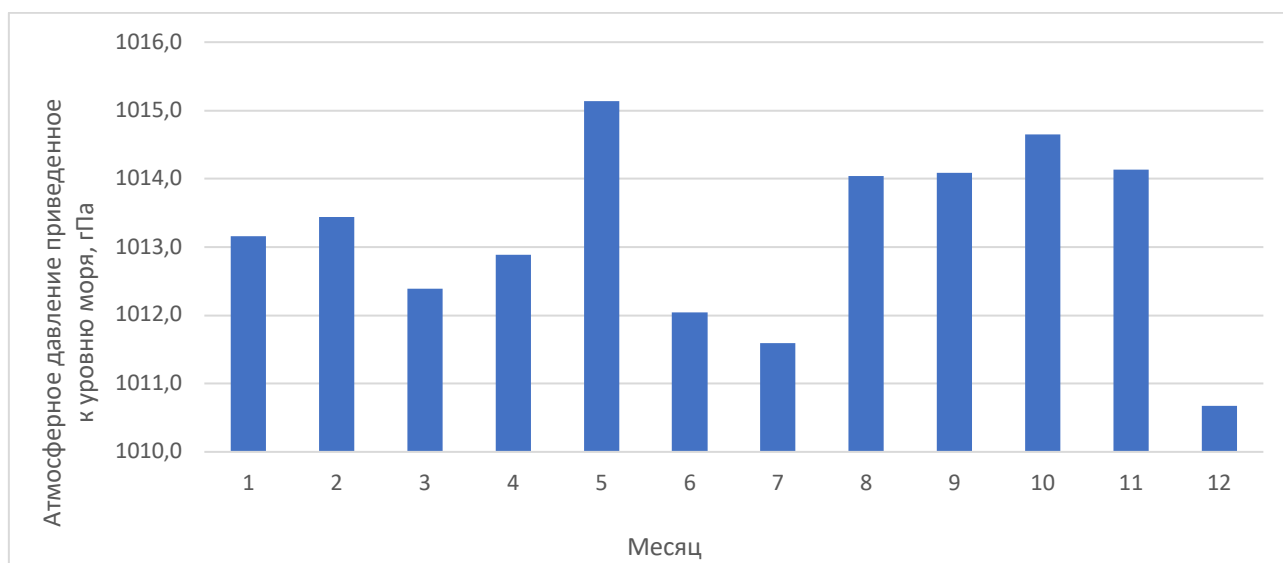


Рисунок 1.6 – Среднемесячные значения атмосферного давления по Санкт-Петербургу за период 2010-2020 гг

Амплитуда годового изменения атмосферного давления составляет 4.5 гПа (см. таблицу 1.7 и рисунок 1.7). [9]

Таблица 1.7 – Среднегодовые значения атмосферного давления за период 2010-2020 гг. по данным с сайта РП5

Год	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Р, гПа	1013,3	1011,9	1013,2	1013,2	1014,6	1011,9	1013,2	1010,6	1015,9	1010,6	1011,9

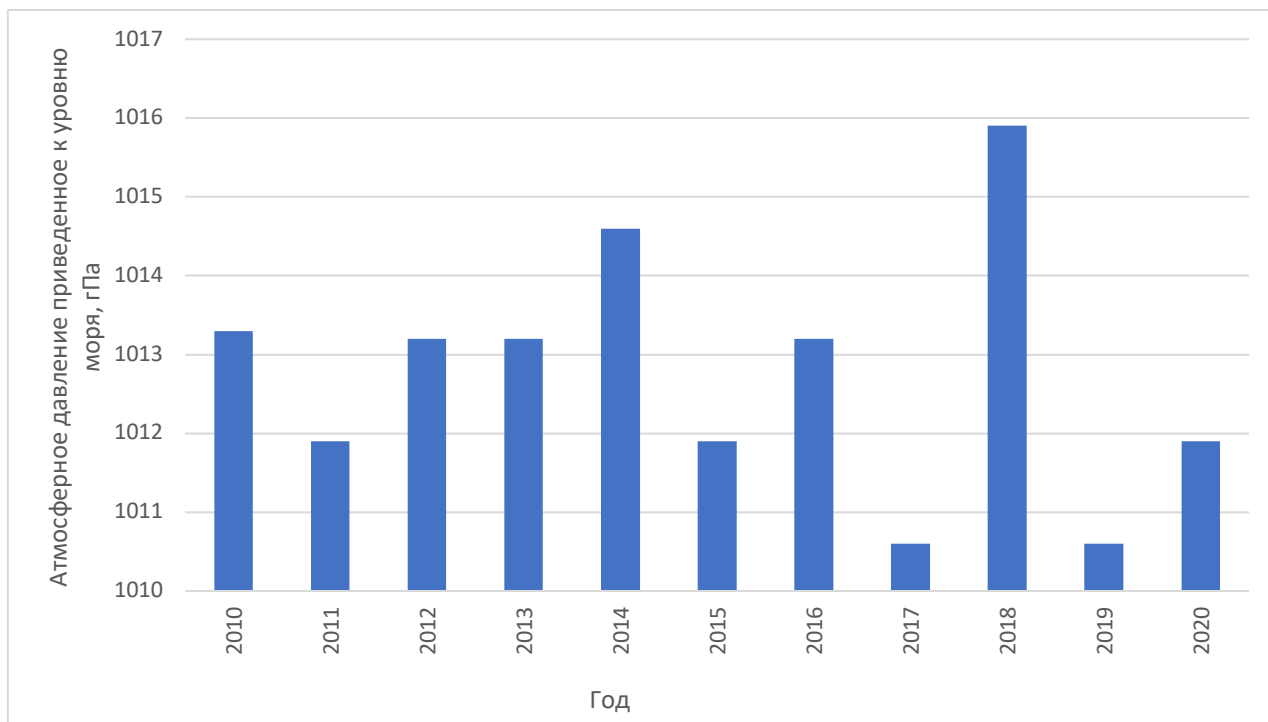


Рисунок 1.7 – Среднегодовые значения атмосферного давления, приведенные к уровню моря по Санкт-Петербургу за 2005-2020 гг

1.6. Скорость ветра в Санкт-Петербурге

Ветровой режим Санкт-Петербурга во многом определяется влиянием Финского залива и особенностями застройки города. Воздушный поток и его скорость могут существенно различаться, что определяется расположением и плотностью застройки.

Обычно осенью и зимой в Санкт-Петербурге барические градиенты и, соответственно, скорости ветра в среднем несколько выше, чем летом. Заметное влияние на направление и скорость ветра здесь оказывают местные условия,

такие как близость Финского залива, различный характер застройки районов и т.д.

В Санкт-Петербурге преобладают ветры западного, юго-западного и южного направлений (см таблицу 1.8, рисунок 1.8 и 1.9). Их среднегодовая повторяемость превышает 50%. Ветры преобладающих направлений являются и самыми сильными, со средней скоростью 3,3-3,7 м/с. Восточные и северные ветры наблюдаются реже, их средняя скорость не превышает 3 м/с. [9]

Таблица 1.8 – Повторяемость направлений ветра [8]

Направление/ год	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	Общегодовая
С	67	78	46	139	127	165	148	136	132	146	107	1291
ССВ	105	113	108	165	140	99	97	98	171	138	106	1340
СВ	233	162	174	103	98	50	120	130	192	126	120	1508
ВСВ	194	129	143	148	136	73	98	97	93	78	73	1262
В	163	108	140	174	149	138	157	112	182	149	160	1632
ВЮВ	201	133	185	154	211	208	235	227	292	207	246	2299
ЮВ	224	171	274	64	75	64	38	54	53	47	40	1104
ЮЮВ	67	63	95	53	71	44	35	49	54	65	41	637
Ю	111	118	113	123	196	200	227	262	229	293	294	2166
ЮЮЗ	130	153	146	226	270	180	141	189	162	191	219	2007
ЮЗ	318	477	360	306	266	330	302	323	353	326	352	3713
ЗЮЗ	247	301	270	325	294	330	251	298	196	247	266	3025
З	244	252	275	360	350	469	361	379	248	308	314	3560
ЗСЗ	198	224	203	156	148	166	136	136	114	109	124	1714
СЗ	80	84	85	76	65	95	132	125	97	119	114	1072
ССЗ	109	121	81	89	63	87	116	111	89	100	81	1047

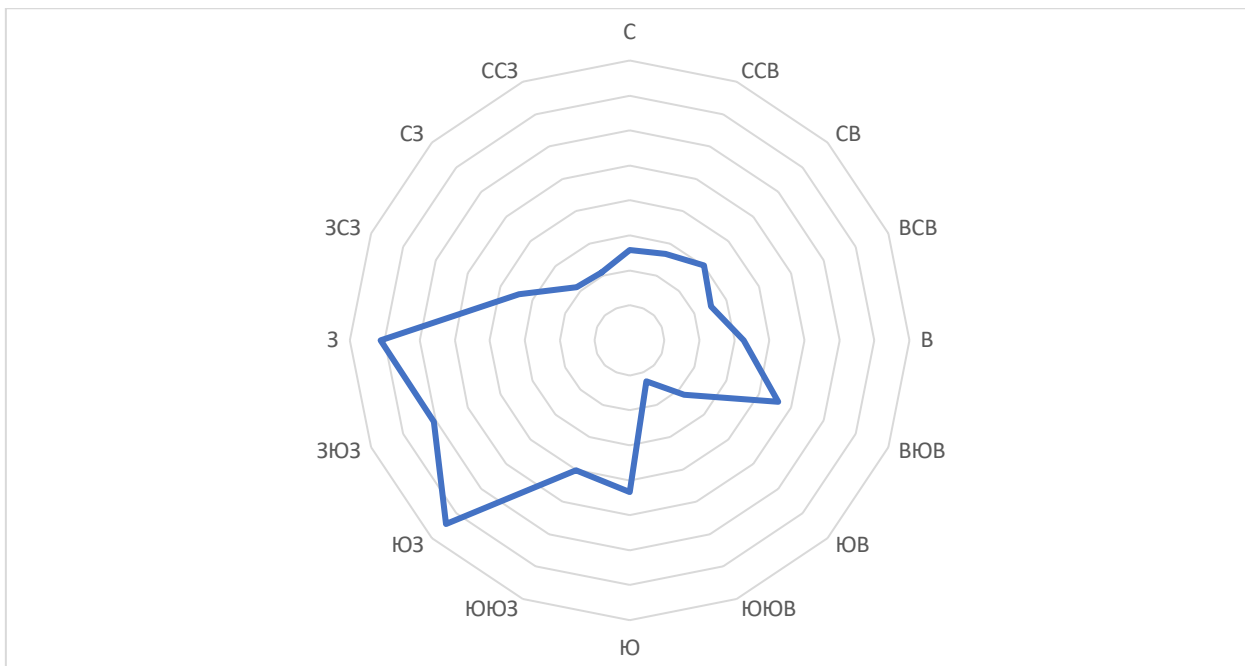


Рисунок 1.8 – Роза ветров по Санкт-Петербургу за весь период 2010-2020 гг

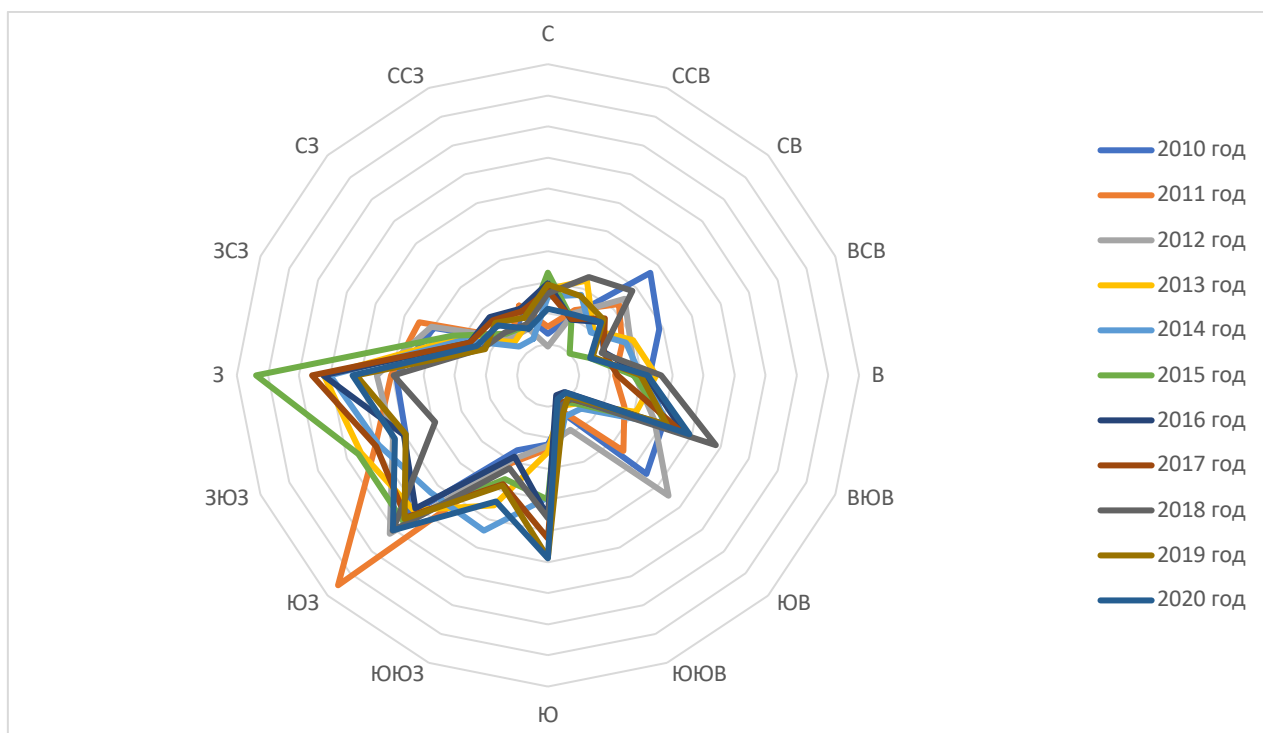


Рисунок 1.9 – Роза ветров по Санкт-Петербургу по годам в период 2010-2020 гг

В теплый период наблюдается суточная периодичность изменения направления ветра, связанная с бризовым эффектом.

Таблица 1.9 – Среднемесячные значения годового хода средней скорости по Санкт-Петербургу за период 2010-2020 гг [8]

год/месяц	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12
2010	1,64	1,82	1,98	1,92	1,65	1,77	1,57	1,58	1,61	2,19	2,03	1,75
2011	2,25	1,75	2,6	2,07	2	1,67	1,45	1,64	1,94	2,48	2,5	3,36
2012	1,98	1,62	2,19	1,98	2,08	2,04	2,09	1,62	2,24	1,93	2,59	2,59
2013	2,27	1,88	1,94	2,25	1,71	1,63	1,58	1,88	1,26	2,44	2,93	2,96
2014	1,75	2,22	2,29	2,22	1,76	1,68	1,4	1,76	1,67	1,76	1,64	2,58
2015	2,34	2,39	2,22	2,37	1,97	2,37	1,94	1,71	1,44	1,96	2,17	2,77
2016	1,35	2,44	1,62	1,71	1,2	1,71	1,69	1,71	1,6	1,69	2,12	2,51
2017	2,23	1,99	2,25	2,22	1,94	2,03	1,59	1,91	1,38	1,87	2,38	2,33
2018	2,17	1,58	1,88	1,63	1,43	2,17	1,31	1,81	2,29	1,82	2,33	1,8
2019	1,98	2,67	2,35	1,44	1,85	1,98	1,44	1,52	1,73	1,98	2,02	2,51
2020	2,97	3,01	2,22	2,34	1,92	1,41	2,02	1,39	2,15	1,59	2,37	2,25
Ср. знач	2,08	2,12	2,14	2,01	1,77	1,86	1,64	1,68	1,75	1,97	2,28	2,49

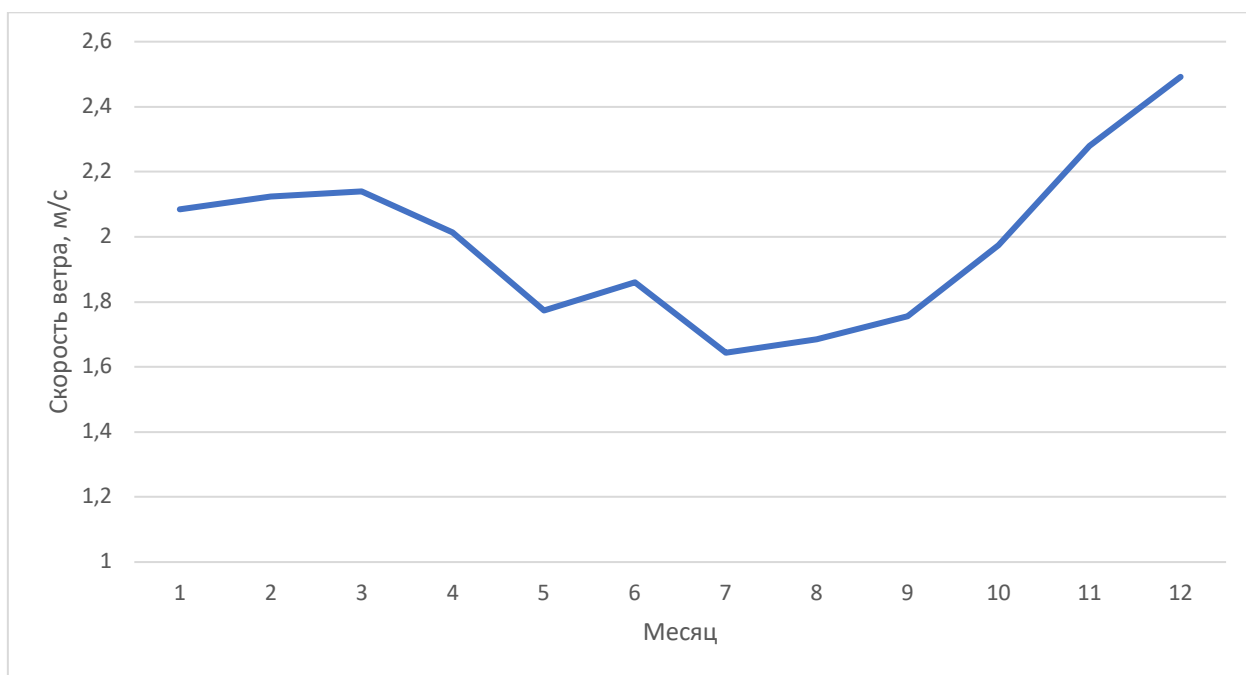


Рисунок 1.10 – Среднемесячные значения годового хода средней скорости по Санкт-Петербургу за период 2010-2020 гг

1.7. Климатические условия Москвы

Географическое положение Москвы в умеренных широтах с относящимся к ним радиационным и циркуляционным режимом определяет ее климат. Кроме

того, на качество погоды в городе влияют как сухопутный, так и океанический климаты, поскольку Москва расположена на пересечении центра Азиатского континента и Атлантического океана. Легче всего охарактеризовать климат Москвы как умеренно континентальный, при этом континентальность составляет около 42%. Зимой здесь часто бывает очень холодно, но временами наступают оттепели, и летом ясная жаркая погода сменяется дождливой и относительно прохладной. Основную роль в формировании климата Москвы играют юго-западные и западные ветры, которые переносят морской воздух Атлантики. Различия в температуре между сушей и водной поверхностью при холодных периодах года оказывают значительное влияние на погоду в городе. К наиболее частым климатообразующим факторам для Москвы можно отнести умеренные воздушные массы, преобразованные из морской атмосферы умеренного и арктического поясов, хотя непостоянство погоды и резкие изменения всегда могут случиться. [10]

1.8. Температура воздуха над Москвой

Окружающая среда, включая условия радиации и атмосферной циркуляции, а также тип подстилающей поверхности, определяют температурный режим местности. Воздушная температура является важным показателем климата. Январь является самым холодным месяцем в Москве и других местах с континентальным климатом, среднесуточная температура в этот период составляет $-9,5^{\circ}$ в центре города и $-10,5^{\circ}$ на окраинах (см. таблица 1.10). Февраль характеризуется вышеудерживающейся суточной температурой на $0,5^{\circ}$ по сравнению с январем благодаря более теплой дневной погоде.

Таблица 1.10 – Значения максимальной и минимальной температуры за период 2000-2022 гг [11]

Месяц	Min T, °C	Max T, °C
январь	-14,5	0,1
февраль	-13,3	-0,3
март	-6,5	4,4

Продолжение таблицы 1.10

апрель	4,6	11,1
май	10,7	16,9
июнь	12,8	20,5
июль	16,8	26
август	15,6	21,9
сентябрь	9,9	14,6
октябрь	2,6	9,2
ноябрь	-2,7	4
декабрь	-12,6	1,2

На рисунках 1.11 и 1.12 представлены графики минимальных и максимальных среднемесячных температур за период 2000-2022 гг.

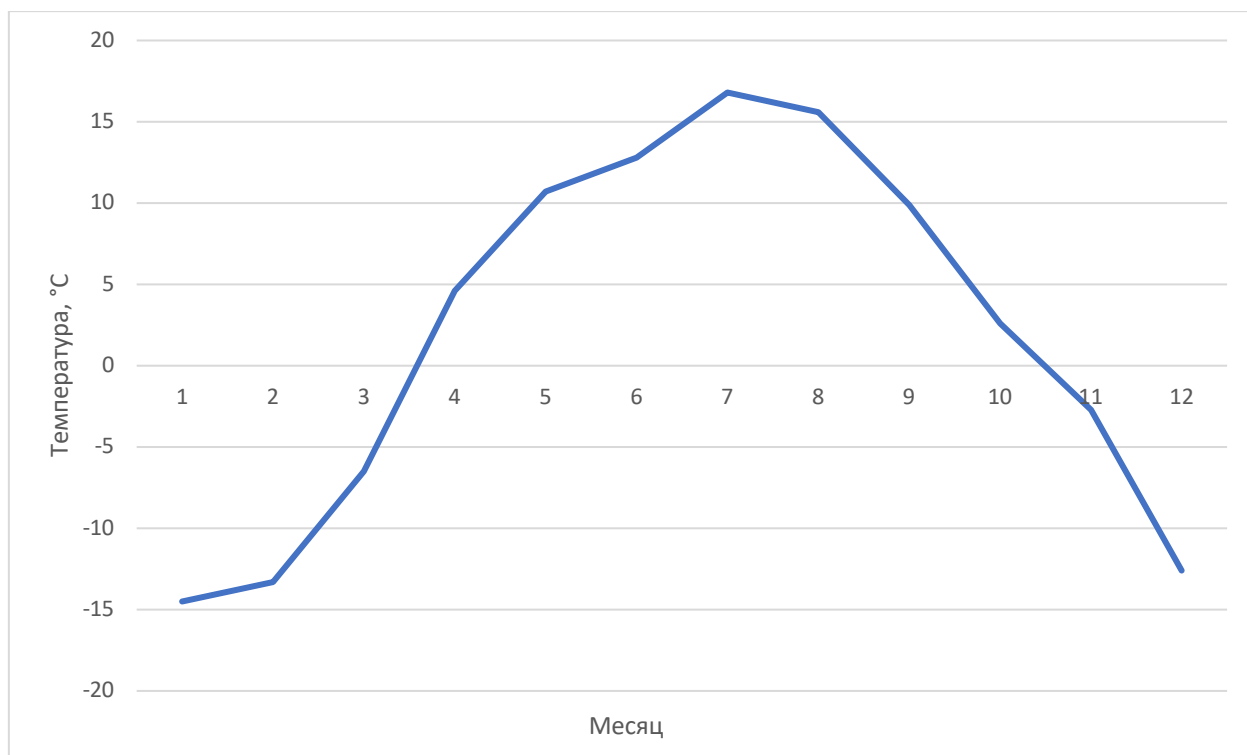


Рисунок 1.11 – Минимальные значения среднемесячной температуры воздуха за период 2000-2022гг

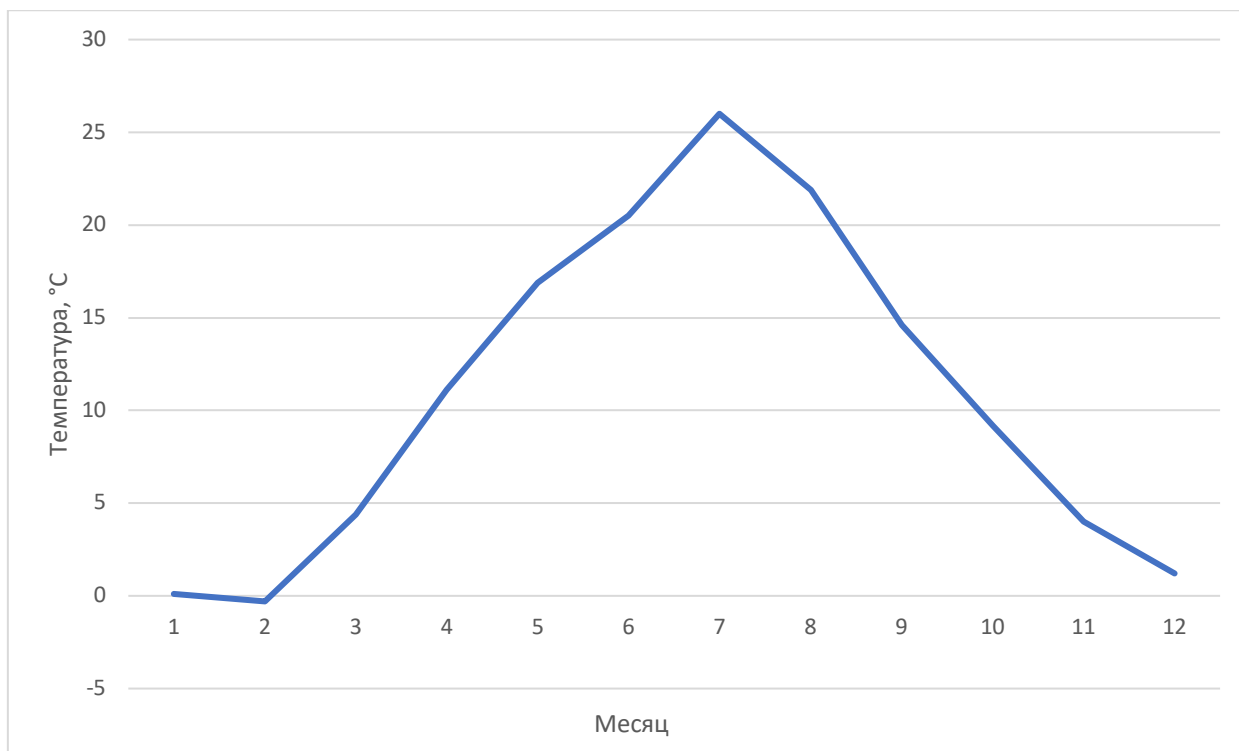


Рисунок 1.12 – Максимальные значения среднемесячной температуры воздуха за период 2000-2022гг

Несмотря на увеличение интенсивности солнечной радиации в феврале, таяние снега и частая адвекция холодных масс воздуха могут препятствовать подъему температуры воздуха в конце зимы - начале весны. После схода снега рост температуры весной происходит быстрее, чем падение ее осенью, когда океан теплее, а зональный перенос воздуха сильнее. В пределах Москвы температуры воздуха значительно различаются в разных районах, но все же имеются общие закономерности, например, средняя суточная температура в центре всегда выше, чем на окраинах города.

Особенности циркуляции воздуха в зимний период могут привести к сильному отклонению температуры воздуха от средней многолетней нормы, особенно в декабре-феврале, и обычно наблюдается большое количество отрицательных отклонений. В теплый период года отклонения значительно меньше. Это может объясняться тем, что арктический воздух приходит уже частично прогретым. [10]

Таблица 1.11 – Средние месячные температуры в Москве за период 2000-2022 гг [11]

Год	январь	февраль	март	апрель	май	июнь	июль	август	сентябрь	октябрь	ноябрь	декабрь
2000	-6,1	-2,7	-0,7	11,1	10,8	16,2	19,3	16,7	10	7,2	-0,1	-2,6
2001	-4,3	-7,2	-2,1	11	11,2	16,3	23	17	12,2	4,8	-0,5	-10,6
2002	-4,8	-0,4	2,2	7,2	12,7	17,3	22,6	17	12	2,6	-1,5	-12,6
2003	-7,3	-8,6	-2,7	4,7	15,5	12,8	20,6	16,9	11,3	5,6	1,1	-2,1
2004	-6,5	-7	1,3	4,6	11,4	15,3	19	18,4	12,1	5,9	-1,6	-2,9
2005	-3	-8,9	-6	7,1	14,8	16,5	19,3	17,6	13,1	6	1,4	-4,1
2006	-10,8	-13,3	-3,7	6	12,4	18,2	18	17,5	13,3	7	0,7	1,2
2007	-1,6	-11	4,4	5,8	15,9	17,4	18,9	20,2	11,8	7	-2	-2
2008	-5,8	-1,5	1,8	9,4	11,3	15,6	19,1	17,5	10,9	8,9	2,3	-1,8
2009	-5,6	-5,4	-0,6	5,1	13,6	17,3	18,8	15,6	13,8	5,8	2,2	-6,5
2010	-14,5	-8,4	-1,1	8,3	16,7	18,8	26	21,8	11,7	3,8	2,7	-7,6
2011	-7,5	-11	-2	6,4	14,6	19	23,4	18,7	12,1	6,6	0,2	-0,1
2012	-6,8	-11,7	-3,1	8,2	15,1	17,1	20,9	17,7	12,9	6,5	1,6	-8,6
2013	-8,5	-3,5	-6,5	6,1	16,9	19,8	18,9	18,3	10,3	6,6	4	-1,7
2014	-8,6	-1,9	2,8	7	16	16,1	21,1	19,2	12,3	3,7	-1,3	-3,9
2015	-4,4	-2,2	2	6,1	14,2	17,9	18,3	17,6	13,8	4,4	0,8	0,2
2016	-10,1	-0,6	0,3	8,1	15	18,2	20,9	19,5	11,4	4,4	-2,7	-4,6
2017	-7,8	-4,6	2,4	5,3	10,9	14,4	17,9	18,8	13	5	0	0
2018	-4,3	-9,1	-5,1	7,8	16,2	17,3	20,5	19,8	14,6	7,3	-0,6	-5,6
2019	-6,6	-1,4	0,7	8,1	16,3	19,6	16,8	16,4	12,3	8,8	1,8	0,8
2020	0,1	-0,3	3,8	4,8	11,7	18,9	18,7	17,6	13,9	9,2	2,2	-4,4
2021	-5,8	-10,5	-1,3	7,5	14,3	20,5	22,2	19,5	9,9	6,4	2,3	-7
2022	-5,4	-0,9	-0,7	5,8	10,7	18,9	20,7	21,9	10,1	7,2	-0,6	-4,1

На рисунке 1.13 представлен график среднегодовых значений температуры воздуха в Москве, где видно рост тенденции.

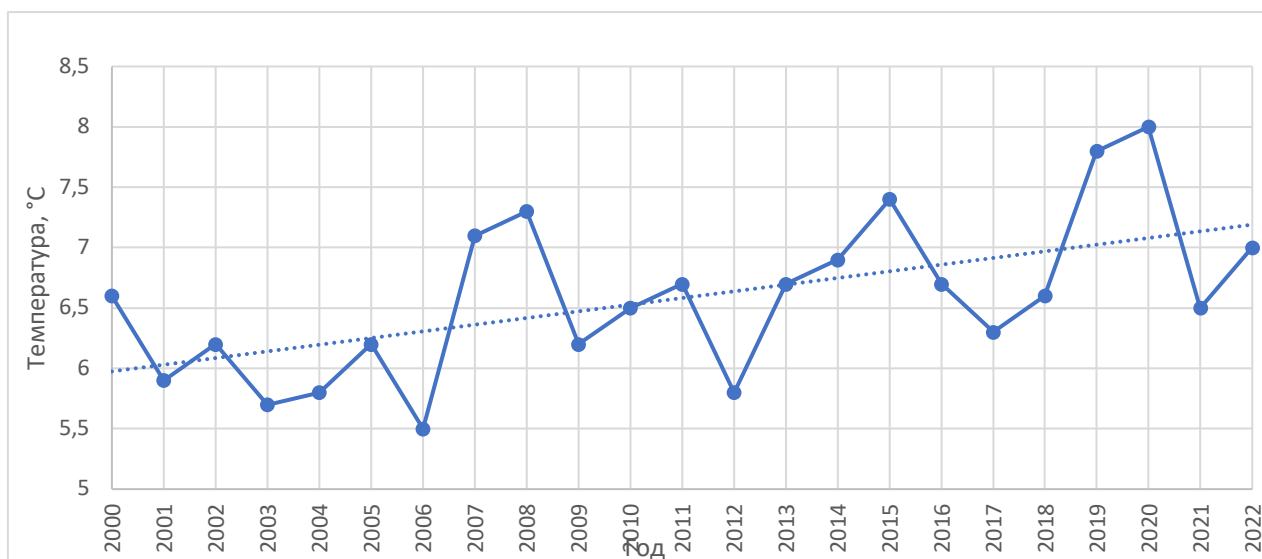


Рисунок 1.13 – Среднегодовые значения температуры воздуха в Москве

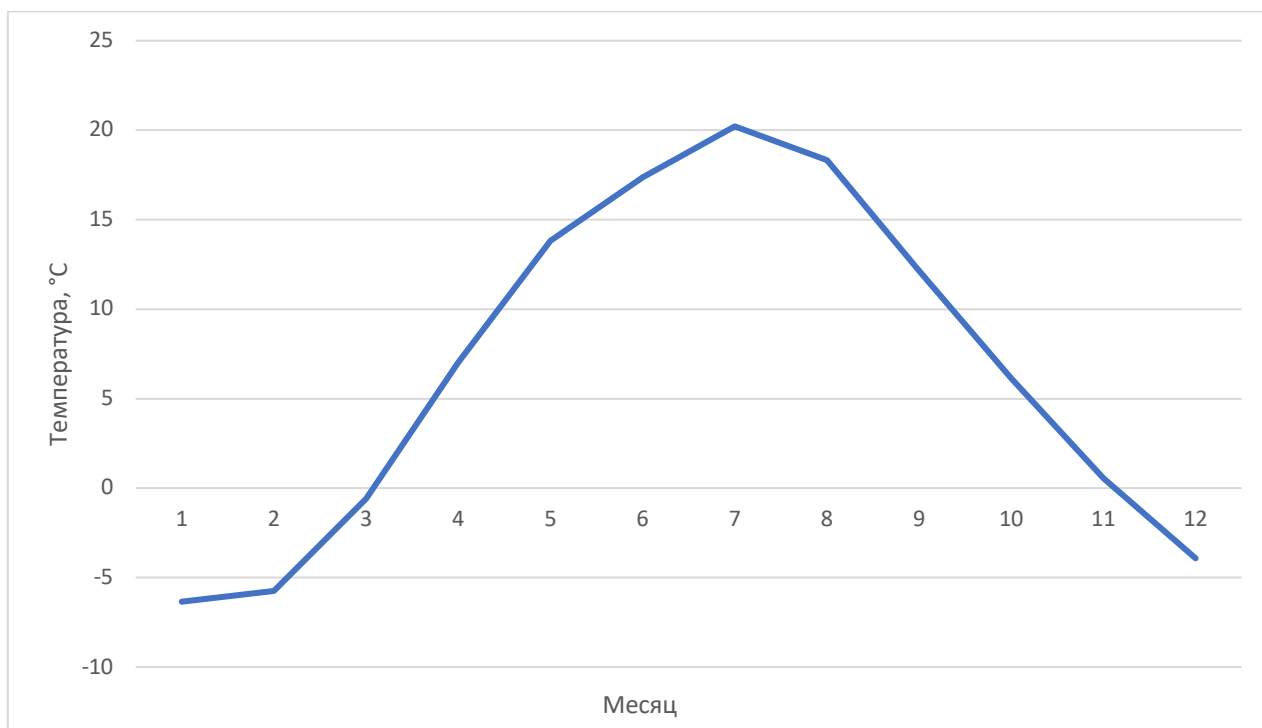


Рисунок 1.14 – Среднемесячные значения температуры в Москве за период 2000-2022 гг

1.9. Влажность в Москве

Атмосферная влажность характеризует количество водяного пара в воздухе, его степень насыщенности и недостаток насыщения. Относительная влажность меняется в течение года в зависимости от температуры воздуха. В холодный период относительная влажность в Москве достигает 83-88% и мало меняется в течение суток, а в летний период в дневное время ее значения уменьшаются до 50-55%, а в ночное увеличиваются до 80%.

Значения относительной влажности и недостатка насыщения изменяются от года к году, особенно в дневное время. Испарение с поверхности почвы или снега зависит от относительной влажности, недостатка насыщения, температуры воздуха и ветра в нижнем слое. В зимние месяцы его практически не бывает, а в летний период может достигать 75-100 мм в месяц и в среднем за год составляет 450-500 мм. [10]

1.10 Осадки в Москве

Осадки в Москве зависят от нескольких факторов, включая влажность воздуха, конденсации ядер, загрязненности атмосферы, а также характера атмосферной циркуляции. При прохождении циклонов и фронтов в основном происходят осадки. В непосредственной близости от прохождения фронтов через Москву выпадает 63% годовой суммы осадков, в то время как только 10% продиктовано отсутствием влияния фронтов. Большинство осадков происходит летом, а зимой - осадки теплого фронта вносят наибольший вклад. Несмотря на то, что период максимального количества осадков приходится на июль, город в целом оказывает на это не очень большое влияние. В городе также существуют некоторые проблемы со стоком осадков в пониженных местах, что необходимо учитывать при расчете пропускной способности канализационной сети.

Измеренное годовое количество осадков в пределах Москвы составляет в среднем 550-650 мм. Однако следует учитывать, что осадкомер улавливает

примерно 120-150 мм осадков в год, которые проносятся ветром мимо прибора и частично расходуются на смачивание ведра. Таким образом, с учетом потерь, годовое количество осадков составляет 700-770 мм (см. таблицу 1.12). [10]

Таблица 1.12 – Месячные и годовые суммы выпавших осадков в Москве за период 2000-2022 гг [11]

Год	январь	февраль	март	апрель	май	июнь	июль	август	сентябрь	октябрь	ноябрь	декабрь	Общ.
2000	42	56	46	27	37	116	167	83	51	32	43	82	780
2001	38	91	48	29	112	72	89	57	38	70	66	54	763
2002	48	49	30	14	18	50	24	21	80	132	41	37	541
2003	45	9	21	46	41	80	66	145	100	53	52	42	701
2004	88	51	30	37	58	76	153	80	88	84	63	57	865
2005	98	43	40	49	81	89	87	29	12	45	31	79	681
2006	27	36	47	44	56	55	35	129	60	53	51	32	625
2007	70	47	39	24	34	21	81	87	57	109	65	14	648
2008	33	59	56	51	68	76	181	115	70	63	47	52	871
2009	42	51	36	25	59	46	91	86	43	136	70	56	740
2010	18	64	22	31	59	62	12	68	70	42	75	79	602
2011	37	38	21	44	25	38	71	62	75	63	45	76	594
2012	58	36	62	50	54	91	52	85	47	138	89	49	811
2013	45	39	77	64	92	49	118	78	183	30	62	54	891
2014	41	19	18	22	70	74	4	82	38	36	20	64	488
2015	62	40	14	44	120	93	119	14	88	21	41	61	717
2016	77	64	50	34	63	62	121	167	58	49	92	45	881
2017	44	36	57	77	83	139	103	68	38	93	46	86	870
2018	66	64	31	47	61	56	93	28	78	57	18	53	652
2019	68	34	40	9	55	67	71	58	29	58	35	33	556
2020	55	40	49	29	160	159	175	34	65	55	50	31	901
2021	67	71	34	90	93	63	43	110	85	41	66	54	817
2022	59	34	13	69	61	42	91	4	75	58	31	111	648

На рисунке 1.15 представлена диаграмма со среднегодовыми суммами выпадения осадков в Москве за период 2000-2022 гг., а на рисунке 1.16 диаграмма со среднемесячными суммами выпадения осадков в Москве за тот же период.

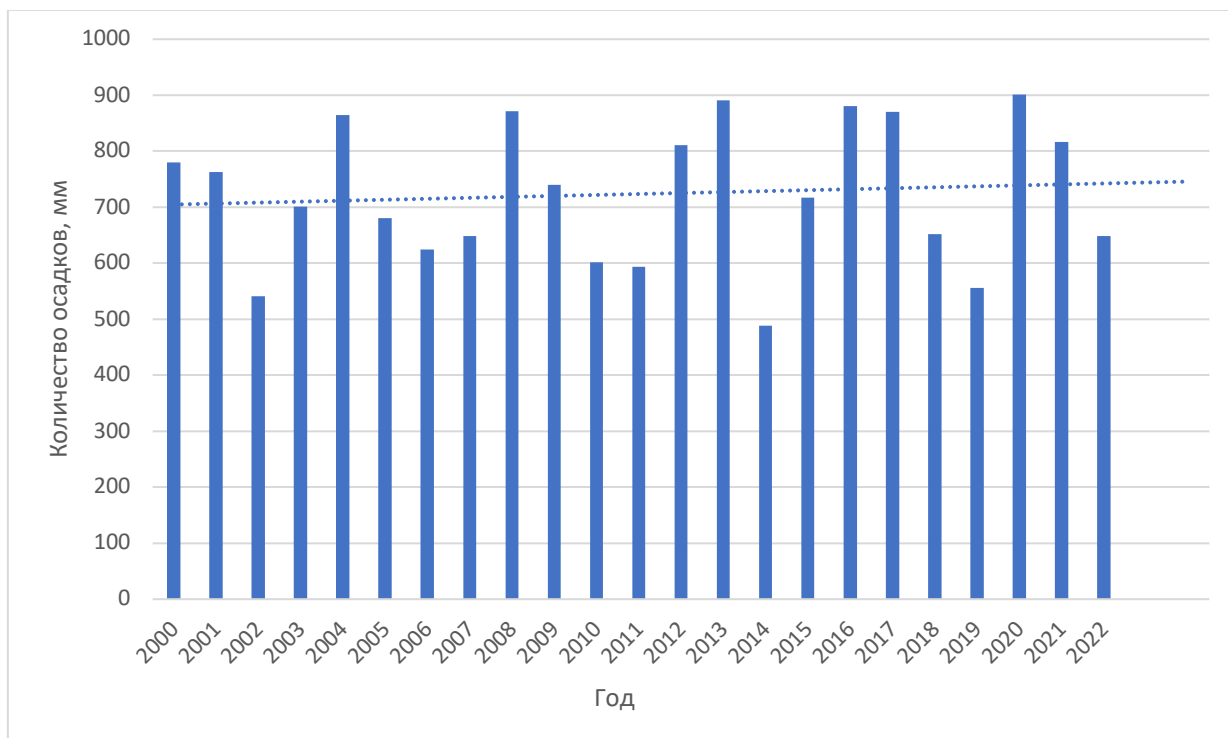


Рисунок 1.15 – Среднегодовые суммы выпадения осадков в Москве за период 2000-2022 гг

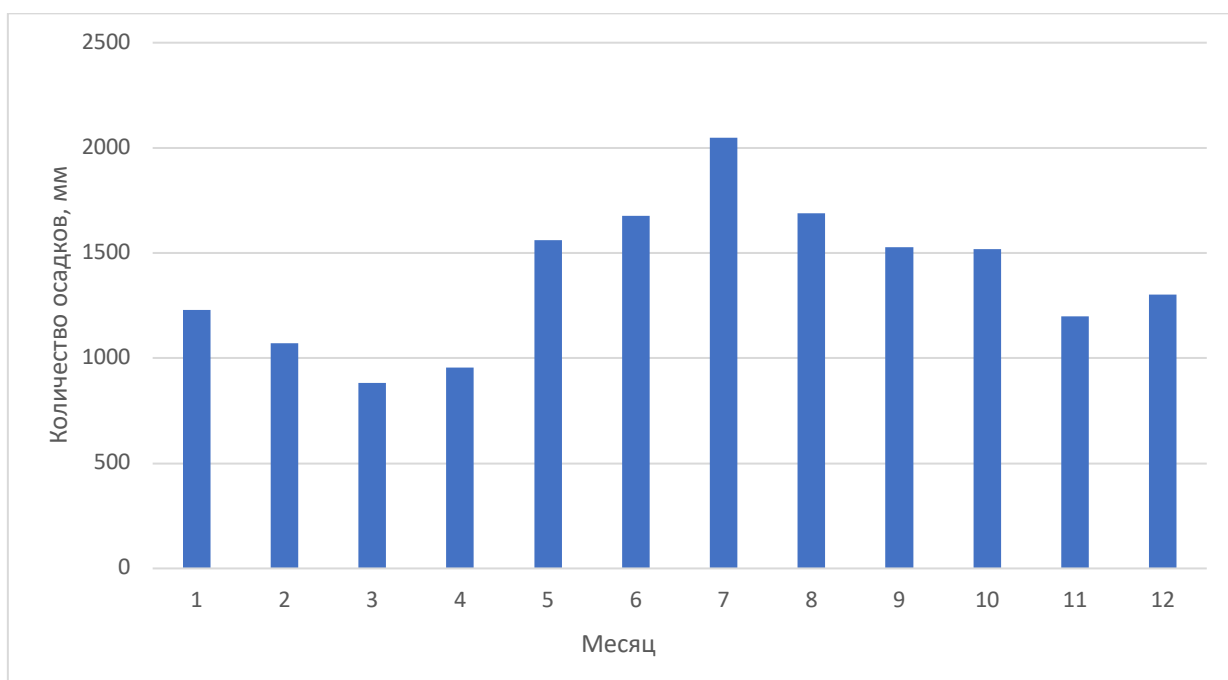


Рисунок 1.16 – Среднемесячные суммы выпадения осадков в Москве

1.11. Атмосферное давление в Москве

Характерной особенностью годового хода давления являются значительные колебания в зимний период и более стабильные значения в летний период (см. таблица 1.13 и рисунок 1.17). По многолетним данным, средняя месячная величина давления в период с октября по февраль почти не меняется, в то время как летом (июнь-август) наблюдается наименьшее среднее месячное давление. Несмотря на это, в отдельные дни могут быть значительные отклонения от средней месячной величины.

Таблица 1.13 – Среднегодовые значения атмосферного давления за период 2010-2020 гг [11]

Год	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
P, гПа	1007,6	1010,4	1010,8	1000,3	1017,7	1012,4	1015,7	1014,5	1018,3	1014,4	1015,7



Рисунок 1.17 – Среднегодовые значения атмосферного давления в Москве

Минимальное давление в холодный период обычно приходится на предутренние часы, а летом на 16-19 часов. С другой стороны, максимальное давление с декабря по апрель отмечается с 20 до 24 часов, а в остальные месяцы - с 7 до 12 часов. Это можно объяснить колебаниями температуры в течение дня. Однако, изменения давления в значительной степени могут быть вызваны непредсказуемой циркуляцией атмосферы, так что некоторые дни зимой давление может понизиться на 30-32 гПа при прохождении циклона или фронта, а затем подняться на равную величину при вхождении антициклона. Летом изменения давления в течение суток обычно несколько ниже (см. таблица 1.14 и рисунок 1.18).

Таблица 1.14 – Среднемесячные значения атмосферного давления по Санкт-Петербургу за период 2010-2020 гг [11]

год/ мес	январь	февраль	март	апрель	май	июнь	июль	август	сентябрь	октябрь	ноябрь	декабрь
2010	1016,5	1020,3	1012,4	1018,4	1000,3	1000,2	1000,2	1013,5	1013,5	1010,5	1010,7	1006,9
2011	1018,5	1018,9	1013,1	1008,5	1005,1	1011,6	1008,2	1006,7	1006,7	1004,7	1015,7	1004,1
2012	1017,9	1020,9	1006,3	1005,4	1003,8	1011,1	1002,2	1005,3	1005,3	1014,1	1018,7	1024,5
2013	1015,1	1014,9	1012,8	1017,7	1014,9	1014,7	1010,7	1009,4	1009,4	1017,8	1009,7	1014,4
2014	1014,6	1021,2	1014,2	1016,8	1016,8	1011,7	1017,5	1020,7	1020,7	1021,9	1029,9	1015,1
2015	1012,2	1016,8	1025,6	1008,3	1012,1	1014,2	1010,5	1019,9	1019,9	1021,4	1012,7	1015,2
2016	1014,7	1014,8	1015,3	1011,1	1015,1	1013,9	1011,1	1014,2	1014,2	1028,7	1017,8	1014,5
2017	1018,7	1017,5	1014,8	1012,8	1014,3	1007,6	1009,4	1020,3	1020,3	1011,9	1017,5	1012,1
2018	1020,9	1024,2	1014,1	1014,8	1020,1	1012,4	1011,2	1017,3	1017,3	1018,2	1029,1	1021,7
2019	1011,1	1014,6	1008,8	1022,8	1013,7	1017,1	1007,3	1015,2	1015,2	1012,9	1023,2	1012,1
2020	1012,7	1006,5	1016,5	1009,8	1011,9	1015,9	1011,6	1013,9	1017,6	1019,4	1023,3	1028,9
Ср. знач	1015,7	1017,3	1014,0	1013,3	1011,6	1011,9	1009,1	1014,2	1014,6	1016,5	1018,9	1015,4

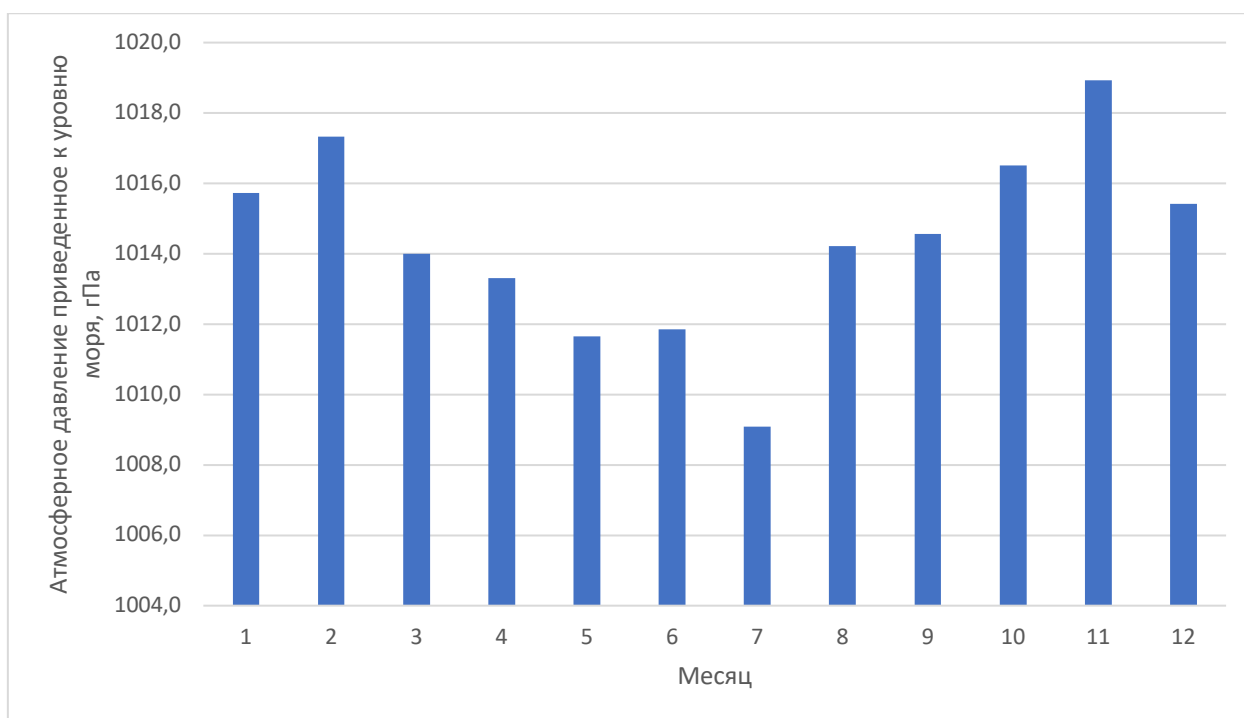


Рисунок 1.18– Среднемесячные значения атмосферного давления по Москве за период 2010-2020 гг

Давление является одним из главных факторов, определяющих направление воздушных потоков.[10]

1.12. Скорость ветра в Москве

В холодный период года в Москве и Подмосковье преобладает западный перенос, который связан с общей циркуляцией атмосферы и проявляется в определенном режиме ветра. Над Москвой находится северо-западная периферия области повышенного давления, что способствует увеличению циклонической деятельности в этот период. Юго-западные, южные и западные ветры преобладают в районе Москвы, особенно при юго-западных и южных ветрах, которые часто вызывают оттепели. В холодный период года ветры северо-западного, северо-восточного и восточного направлений проявляются гораздо реже и связаны с антициклонами (см. таблица 1.15, рисунок 1.19 и 1.20).

Летом Москва и Подмосковье находятся в области пониженного давления, распространяющейся над северной частью Европейской территории. Над

арктическими морями располагается область повышенного давления, а к югу от Москвы проходит отрог повышенного давления азорского максимума. В период от апреля до мая увеличивается повторяемость северо-западных и северных ветров, но преобладающее направление выражено слабо.

Таблица 1.15 – Повторяемость направлений ветра [11]

Направление/год	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	Общегодовая
С	84	141	156	446	827	533	245	245	188	182	144	3191
ССВ	110	222	139	144	336	165	91	89	134	108	61	1599
СВ	162	160	147	78	201	76	103	44	69	65	42	1147
ВСВ	74	68	58	75	190	111	67	46	70	42	40	841
В	86	57	83	119	277	123	125	74	119	56	48	1167
ВЮВ	100	65	77	87	199	78	97	57	92	55	67	974
ЮВ	281	160	277	108	382	185	123	117	162	87	139	2021
ЮЮВ	140	133	211	226	536	608	230	289	276	303	263	3215
Ю	135	150	143	245	636	332	206	199	188	268	168	2670
ЮЮЗ	93	104	103	145	328	185	70	97	77	95	77	1374
ЮЗ	176	212	184	121	257	180	70	85	66	104	81	1536
ЗЮЗ	109	115	96	147	432	435	147	180	101	193	188	2143
З	169	230	164	453	710	541	183	254	216	242	250	3412
ЗСЗ	135	218	159	142	270	296	132	147	133	134	135	1901
СЗ	75	142	101	103	337	378	172	170	174	200	145	1997
ССЗ	86	125	114	180	479	458	188	159	144	157	117	2207

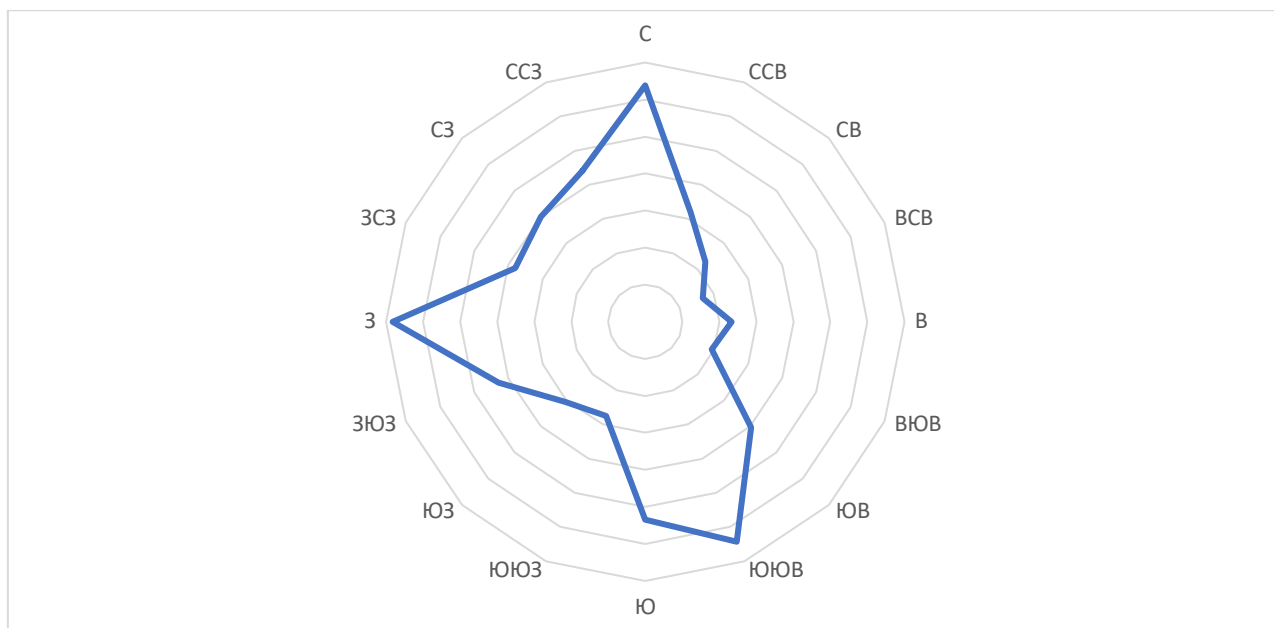


Рисунок 1.19 – Роза ветров по Москве за весь период 2010-2020 гг

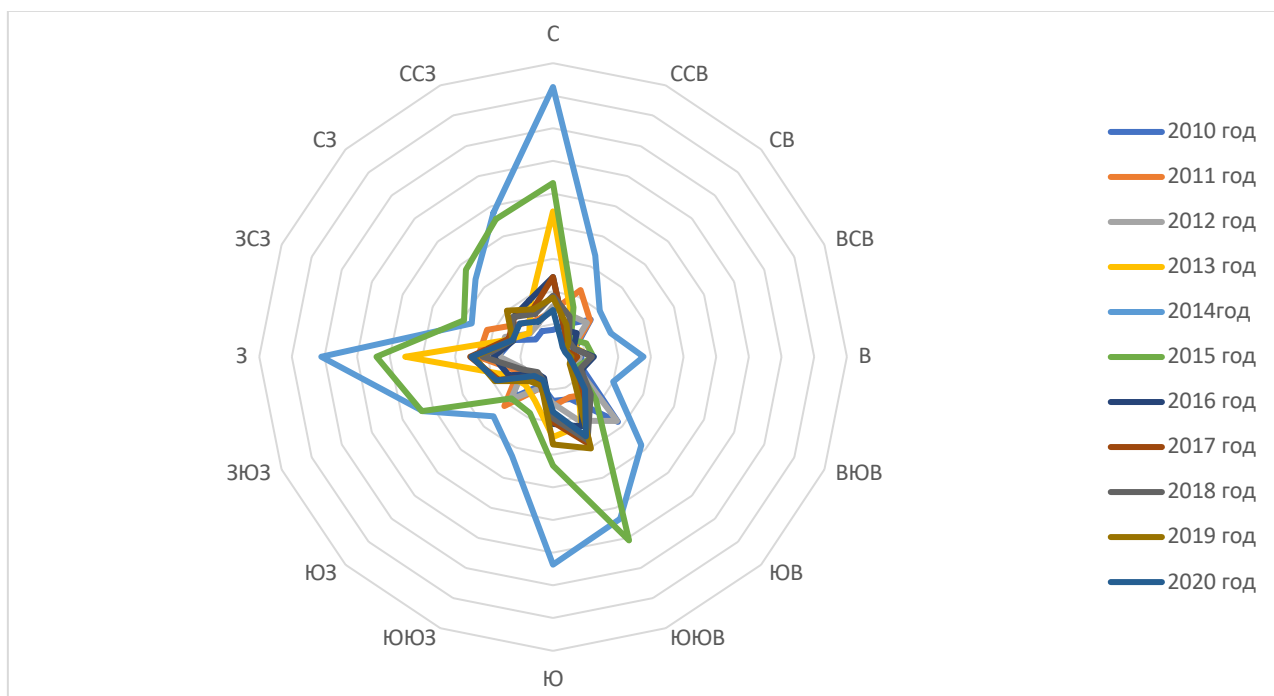


Рисунок 1.20 – Роза ветров по Москве по годам в период 2010-2020 гг

В большом городе ветер может отклоняться от своего нормального направления из-за застройки, исследователи указывают на возникновение местной циркуляции, вызванной пониженным атмосферным давлением. Поднимающийся вверх более теплый воздух заменяется внизу более холодным, притекающим с окраин, что приводит к образованию системы воздушных течений циклонического характера. При безоблачной тихой погоде мелкие

местные завихрения могут образоваться на улицах и во дворах, вызванные термическими различиями.

Для получения достоверных данных о скорости ветра в Москве необходимо учитывать барический градиент, который определяет скорость и направление ветра. В размытых и безградиентных полях скорость ветра обычно минимальна. Сезонный ход характеризуется максимальной скоростью ветра в тылу циклонов, куда поступают массы холодного воздуха при больших градиентах, а также зимой в теплом секторе циклонов. В циклонах скорость ветра преимущественно равна 8—12 м/сек., но наблюдаются отдельные порывы и очень большой силы. Средняя скорость ветра в Москве в антициклонах зимой на 2 м/сек. меньше, чем в циклонах, а летом — на 1 м/сек.

Наличие поверхностей с увеличенной шероховатостью в городе (строения, парки, бульвары, скверы и т.д.) является тормозящим фактором, влияющим на скорость ветра на небольших высотах, однако увеличивает турбулентное перемешивание и связанную с ним порывистость ветра. Характер суточного хода скорости ветра в Москве выражен слабо в холодный период года. В общем потоке воздуха над городом происходит увеличение скорости ветра, а на подветренной стороне площадей и на улицах, направление которых совпадает с направлением ветра, скорость его увеличивается.

Таблица 1.16 – Среднемесячные значения годового хода средней скорости по Москве за период 2010-2020 гг [11]

год/месяц	январь	февраль	март	апрель	май	июнь	июль	август	сентябрь	октябрь	ноябрь	декабрь
2010	0,81	1,48	1,27	1,16	1,12	1,01	0,89	0,83	0,75	1,04	1,47	1,12
2011	1,19	1,61	1,63	1,31	1,21	1,38	0,99	0,98	0,94	1,16	1,59	1,63
2012	1,27	1,29	1,62	1,27	1,29	1,07	0,77	1,23	0,89	1,15	1,22	1,37
2013	1,06	1,21	1,49	1,18	0,91	0,96	1,05	0,81	1,21	0,91	1,42	1,39
2014	1,09	1,08	1,48	1,31	1,08	1,06	1,03	0,76	0,86	1,25	0,77	1,23

Продолжение таблицы 1.16

2015	1,38	1,49	1,5	1,58	1,05	1,1	1,11	1,06	0,65	1,13	1,07	1,36
2016	1,19	1,44	1,31	1,36	1,05	0,95	0,85	0,87	1,11	1,23	1,27	1,16
2017	1,39	1,49	1,12	1,36	1,31	0,98	0,84	0,79	0,89	1,02	1,3	1,24
2018	1,46	1,18	1,38	1,33	1,23	1,02	1	0,73	0,82	0,96	1,15	1,1
2019	1,21	1,54	1,34	1,25	1,15	1	0,89	1,06	0,81	1,25	1,25	1,37
2020	1,22	1,29	1,46	1,39	1,14	0,91	0,69	0,65	0,74	0,47	1,12	0,9
Ср. знач	1,20	1,37	1,41	1,31	1,14	1,04	0,91	0,88	0,87	1,05	1,23	1,26

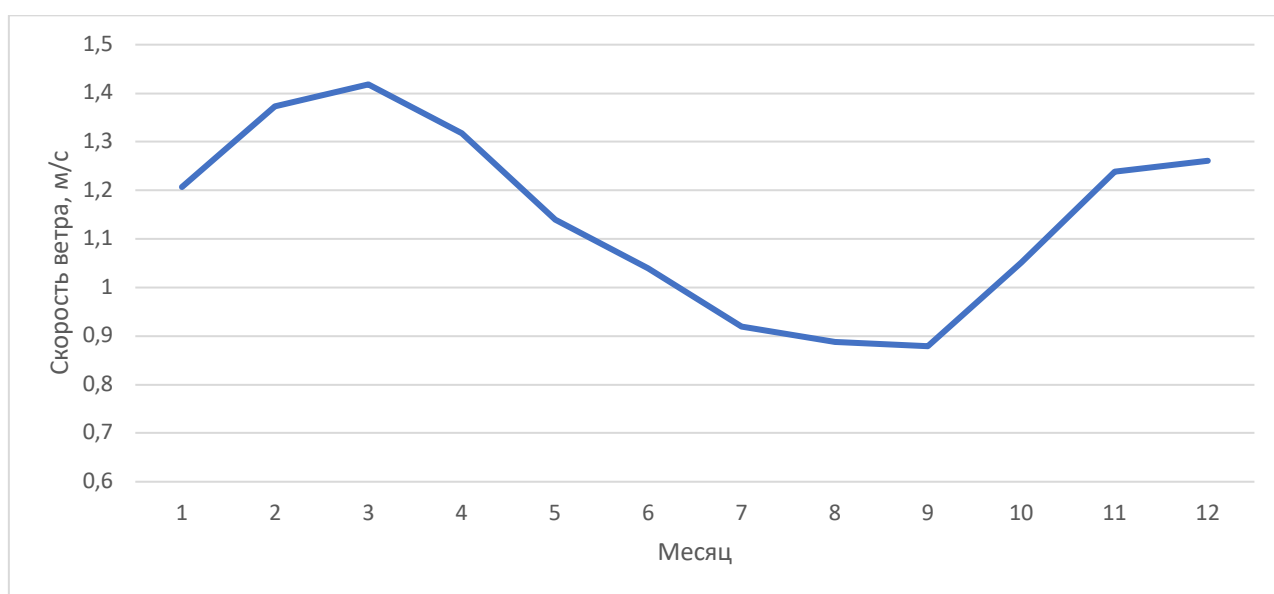


Рисунок 1.21 – Среднемесячные значения годового хода средней скорости по Москве за период 2010-2020 гг

ГЛАВА 2. СОСТОЯНИЕ КАЧЕСТВА АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА НАД ТЕРРИТОРИЯМИ МЕГАПОЛИСОВ РОССИИ.

2.1. Характеристики, определяющие качество атмосферного воздуха

Воздух необходим для выживания человека, но качество атмосферного воздуха ухудшается из-за антропогенной деятельности, такой как транспорт, индустриализация и рост населения. Атмосферный пограничный слой - это самая нижняя область атмосферы, которая взаимодействует с поверхностью Земли посредством обмена теплом, влагой и импульсом. На качество атмосферного воздуха в пограничном слое атмосферы влияет ряд факторов, таких как метеорология, география, землепользование и антропогенная деятельность.

1. Концентрация загрязняющих веществ в воздухе. Загрязнители воздуха - это вещества, присутствующие в атмосфере, которые могут нанести вред здоровью человека, экосистемам и климату. Концентрация загрязнителей воздуха в пограничном слое атмосферы определяется скоростью выбросов, рассеиванием в атмосфере и химическими превращениями. К наиболее распространенным загрязнителям относятся твердые частицы (ТЧ), диоксид серы (SO_2), оксиды азота (NO_x), озон (O_3) и угарный газ (CO) [12]. Концентрация загрязняющих веществ в ЛВБ зависит от местоположения, времени суток и сезона.

2. Метеорология региона. Метеорология относится к изучению атмосферы Земли и процессов, определяющих погоду и климат. На качество атмосферного воздуха в пограничном слое атмосферы влияют такие метеорологические факторы, как температура, скорость и направление ветра, влажность и стабильность атмосферы. Например, высокая скорость ветра и атмосферная неустойчивость могут усилить перемешивание атмосферы, что может рассеять загрязнители воздуха и улучшить его качество [13].

3. География региона. На качество атмосферного воздуха в пограничном слое атмосферы влияет окружающая география, например, наличие гор, долин или водоемов. Например, в районах, окруженных горами, может наблюдаться плохое качество воздуха, поскольку горы могут задерживать загрязняющие воздух вещества, что приводит к образованию купола загрязнения [14]. Напротив, в районах, окруженных водоемами, качество воздуха может улучшиться благодаря охлаждающему эффекту водоемов, который может повысить стабильность атмосферы и уменьшить рассеивание загрязняющих веществ.

4. Деятельность по землепользованию. Под землепользованием понимается использование земли для различных видов деятельности, таких как урбанизация, сельское хозяйство и транспорт. Деятельность по землепользованию может влиять на качество атмосферного воздуха в пограничном слое атмосферы через выбросы загрязняющих веществ, таких как ТЧ, NO_x и летучие органические соединения (ЛОС). Например, в городских районах может наблюдаться плохое качество воздуха из-за высокой концентрации автомобильного движения, промышленной деятельности и жилой активности [15].

5. Атмосферная фотохимия. Атмосферная фотохимия относится к химическим реакциям, происходящим в атмосфере в результате взаимодействия между солнечной радиацией и загрязнителями воздуха. Фотохимия атмосферы играет решающую роль в образовании вторичных загрязняющих веществ, таких как O_3 и твердые частицы. Концентрация первичных загрязнителей, таких как NO_x и ЛОС, влияет на скорость атмосферной фотохимии, которая, в свою очередь, может влиять на качество атмосферного воздуха в пограничном слое атмосферы [15].

2.2. Источники загрязнения атмосферы

Под атмосферным загрязнением понимается присутствие вредных веществ в атмосфере Земли, которое может привести к неблагоприятным последствиям для здоровья человека, окружающей среды и изменения климата. Источники загрязнения атмосферы разнообразны и могут быть разделены на природные и антропогенные (созданные человеком) (см. рисунок 2.1).



Рисунок 2.1 – Классификация источников загрязнения атмосферного воздуха [16]

К природным источникам загрязнения атмосферы относятся извержения вулканов, лесные пожары и пыльные бури. Вулканические извержения выбрасывают в атмосферу большое количество газов, таких как диоксид серы, угарный газ и оксиды азота, которые могут вызвать кислотные дожди и повлиять на качество воздуха [17]. Лесные пожары выделяют дым, угарный газ и другие вредные газы, которые могут влиять на качество воздуха и вызывать проблемы с дыханием [18]. Пыльные бури, распространенные в пустынных регионах,

могут переносить значительное количество мелких частиц и аэрозолей, вызывая проблемы со здоровьем и ухудшая видимость.

Антропогенные источники загрязнения атмосферы ответственны за значительную часть загрязнения воздуха. К основным источникам антропогенного загрязнения относятся транспорт, производство электроэнергии, промышленная деятельность и сельское хозяйство.

Транспорт является значительным источником загрязнения воздуха, особенно в городских районах, где интенсивность движения автотранспорта высока. Выхлопные газы автотранспорта содержат различные загрязняющие вещества, включая ТЧ, NO_x и ЛОС [19]. Эти загрязнители могут вызывать проблемы с дыханием, рак легких и другие проблемы со здоровьем [20].

Производство электроэнергии является еще одним значительным источником загрязнения воздуха. При сжигании ископаемого топлива, такого как уголь, нефть и природный газ, на электростанциях в атмосферу выбрасывается большое количество углекислого газа, диоксида серы и оксидов азота. Эти загрязняющие вещества также могут способствовать изменению климата [21].

Промышленная деятельность также вносит свой вклад в загрязнение воздуха: выбросы в результате производственных процессов, сжигания и утилизации отходов. Промышленное загрязнение может привести к выбросу целого ряда загрязняющих веществ, включая твердые частицы, летучие органические соединения и токсичные химикаты [22].

Сельское хозяйство - еще один значительный источник загрязнения воздуха, выбросы которого связаны с содержанием скота, внесением удобрений и сжиганием урожая. Скот выделяет метан, мощный парниковый газ, а при внесении удобрений выделяются аммиак и оксиды азота, которые также могут вызывать кислотные дожди и способствовать изменению климата. При сжигании сельскохозяйственных культур могут выделяться твердые частицы и угарный газ, что влияет на качество воздуха и здоровье человека [23].

2.3. Основные загрязнители атмосферного воздуха в мегаполисах и их воздействие на окружающую среду

Мегаполисы - это густонаселенные городские районы, в которых проживает более десяти миллионов человек. Эти города являются двигателями экономического роста, но они также вызывают ряд экологических проблем из-за высокого уровня загрязнения воздуха [24]. Основными загрязнителями атмосферного воздуха в мегаполисах являются твердые частицы (ТЧ), оксиды азота (NO_x), оксиды серы (SO_x), угарный газ (CO) и летучие органические соединения (ЛОС).

Твердые частицы (ТЧ):

ТЧ (см. рисунок 2.2) - это сложная смесь мельчайших твердых и жидких частиц, которые находятся во взвешенном состоянии в воздухе. Основными источниками ТЧ в мегаполисах являются автомобильные выхлопы, промышленная деятельность и строительные площадки. ТЧ оказывают негативное воздействие на здоровье человека, особенно на дыхательную и сердечно-сосудистую системы. Он связан с повышением уровня заболеваемости раком легких, болезнями сердца и респираторными инфекциями. Кроме того, ТЧ оказывают воздействие на окружающую среду, например, ухудшают видимость и вызывают кислотные дожди. [25]

ЧАСТИЦЫ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ ИЗМЕРЯЮТСЯ В МИКРОНАХ (МИКРОМЕТРАХ)



Рисунок 2.2 – Классификация ТЧ [26]

Оксиды азота (NO_x):

NO_x - это группа высокореактивных газов, которые образуются при сгорании ископаемого топлива в транспортных средствах и на электростанциях. Основными источниками NO_x в мегаполисах являются транспорт, промышленная деятельность и приготовление пищи на природном газе. NO_x оказывает серьезное воздействие на окружающую среду, такое как кислотные дожди, эвтрофикация и изменение климата. Эвтрофикация - это чрезмерный рост водорослей в водоемах, который может нанести вред водной флоре и фауне. [27]

Оксиды серы (SO_x):

SO_x - это группа высокореактивных газов, которые образуются при сжигании ископаемого топлива на электростанциях и в промышленных процессах. Основными источниками SO_x в мегаполисах являются электростанции, нефтеперерабатывающие заводы и судоходство. SO_x оказывает серьезное воздействие на окружающую среду, такое как кислотные дожди, которые могут повредить сельскохозяйственные культуры и здания. Он также способствует изменению климата, образуя сульфатные аэрозоли, которые отражают солнечный свет обратно в космос. [28]

Монооксид углерода (CO):

CO - это ядовитый газ, который образуется при неполном сгорании ископаемого топлива. Основными источниками CO в мегаполисах являются транспорт и промышленная деятельность. CO оказывает серьезное воздействие на здоровье человека, такое как головная боль, головокружение и спутанность сознания. Он также оказывает воздействие на окружающую среду, например, уменьшает количество кислорода, доступного для дыхания, и способствует изменению климата. [29]

Летучие органические соединения (ЛОС):

ЛОС (см. рисунок 2.3) - это органические соединения, которые имеют высокое давление пара и легко испаряются в воздух. Основными источниками ЛОС в мегаполисах являются транспорт, промышленная деятельность и растворители. ЛОС оказывают серьезное воздействие на здоровье человека,

например, раздражают глаза и дыхательную систему. Они также оказывают воздействие на окружающую среду, например, способствуют образованию озона, который является одним из основных загрязнителей воздуха. [30]

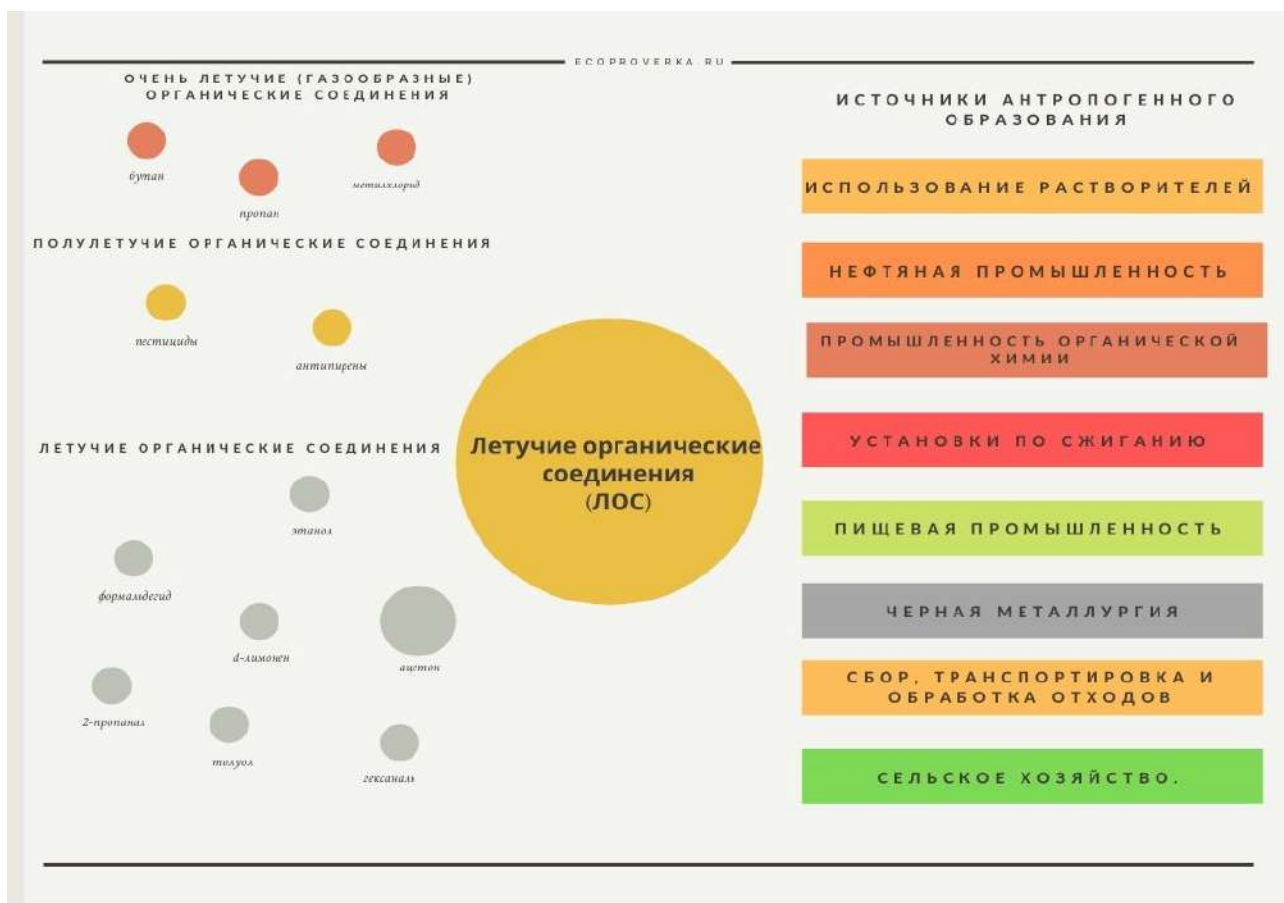


Рисунок 2.3 – Классификация ЛОС [31]

2.4. Предельно допустимые концентрации и комплексные показатели загрязненности атмосферы

Предельно допустимые концентрации - это максимально допустимые концентрации загрязняющих веществ в воздухе, которые считаются безопасными для здоровья человека и окружающей среды. Эти концентрации определяются в ходе исследований по оценке риска и используются регулирующими органами для создания стандартов качества воздуха. ПДК устанавливаются для различных загрязнителей, включая угарный газ, диоксид серы, оксиды азота и твердые частицы. ВОЗ установила ПДК для многих

загрязняющих веществ, и они используются в качестве основы для регулирования качества воздуха во многих странах. [32]

Например, ПДК для угарного газа составляет 9 ppm (частей на миллион) для одночасового среднего воздействия и 2 ppm для восьмичасового среднего воздействия. ПДК для твердых частиц диаметром менее 10 микрометров (PM10) составляет 50 мкг/м³ (микрограммов на кубический метр) в среднем за 24 часа и 20 мкг/м³ в среднем за год. [33]

Комплексные показатели загрязнения атмосферы:

Комплексные показатели загрязнения атмосферы - это меры, которые используются для оценки общего качества воздуха. Эти показатели учитывают несколько загрязняющих веществ и их концентрацию, чтобы создать картину качества воздуха в данной местности.

Одним из примеров комплексного показателя является индекс качества воздуха (см. рисунок 2.4) (AQI). AQI - это шкала от 0 до 500, которая используется для информирования населения о ежедневных уровнях качества воздуха. AQI основан на пяти загрязнителях: приземном озоне, PM2.5, PM10, угарном газе и диоксиде серы.



Рисунок 2.4 – Индекс качества воздуха AQI [34]

AQI присваивает значение каждому загрязняющему веществу и использует самое высокое значение в качестве AQI для данного дня. Например, если концентрация PM_{2.5} составляет 50 мкг/м³, концентрация PM₁₀ - 100 мкг/м³, а концентрация озона - 70 ppb (частей на миллиард), то AQI для этого дня будет равен 100, что считается "умеренным".

Еще одним комплексным показателем загрязнения атмосферы является индекс качества окружающей среды (EQI). EQI - это составной индекс, учитывающий несколько экологических факторов, включая качество воздуха, качество воды, землепользование и токсичные вещества (см. рисунок 2.5). [35]



Рисунок 2.5 – Нормируемые показатели в области охраны окружающей среды [36]

EQI присваивает каждому фактору определенный балл и объединяет их для получения общей оценки. EQI можно использовать для сравнения качества окружающей среды в различных регионах, выявления проблемных областей и отслеживания изменений качества окружающей среды с течением времени. [37]

2.5. Влияние метеорологических условий на качество атмосферного воздуха

Метеорологические условия играют важную роль в определении качества атмосферного воздуха. Температура, влажность, скорость ветра и осадки

вливают на уровень и распределение загрязняющих веществ в воздухе. Связь между метеорологическими условиями и загрязнением воздуха стала предметом многочисленных исследований, результаты которых имеют важное значение для здоровья населения и экологической политики. [38]

Температура является одной из ключевых метеорологических переменных, влияющих на качество воздуха. Повышение температуры может увеличить скорость атмосферных реакций, включая образование озона и других вторичных загрязнителей. В городских районах, где высок уровень выбросов от автотранспорта и промышленности, высокие температуры могут усугубить образование смога. Тепловые волны также могут привести к повышению уровня содержания ТЧ, поскольку дым от лесных пожаров и пыльные бури становятся более частыми. [39]

И наоборот, низкие температуры могут вызвать накопление загрязняющих веществ в застойных воздушных массах. Это явление известно как температурная инверсия, когда слой теплого воздуха задерживает более холодный воздух и загрязняющие вещества у земли. Температурные инверсии часто встречаются в долинах и бассейнах в зимние месяцы, что приводит к повышению уровня загрязнения мелкими частицами.

В период ясной погоды в течение дня поверхность земли охлаждается, вызывая подъем теплого воздуха и опускание холодного воздуха из более высоких слоев атмосферы. Когда атмосфера становится стабильной, объем воздуха, перемещающийся адиабатически вверх, становится более плотным, чем воздух вокруг него, и стремится опуститься. При нормальных условиях температура воздуха с высотой уменьшается, однако при температурной инверсии наблюдается увеличение температуры с высотой. Исследование влияния температурного градиента на перемешивание атмосферных струй подтверждается графическими изображениями 2.6 – 2.9.

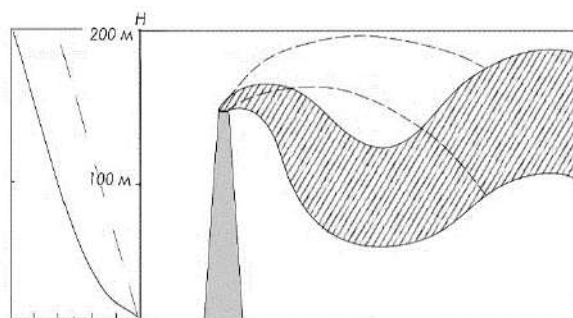


Рисунок 2.6 – «Волнообразный» поток при конвекции

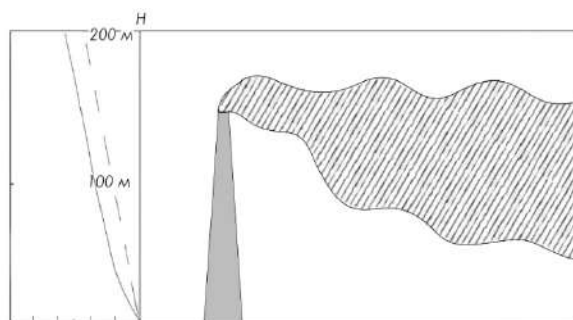


Рисунок 2.7 – «Конусообразный» поток при изотермии

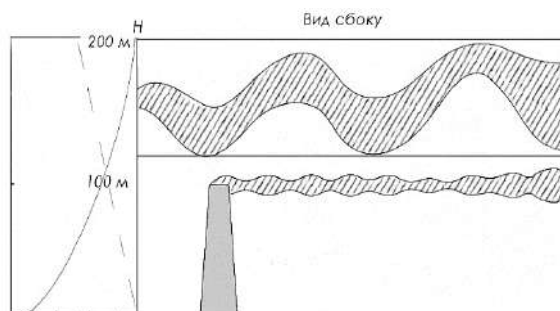


Рисунок 2.8 – «Веерный» поток при изотермии

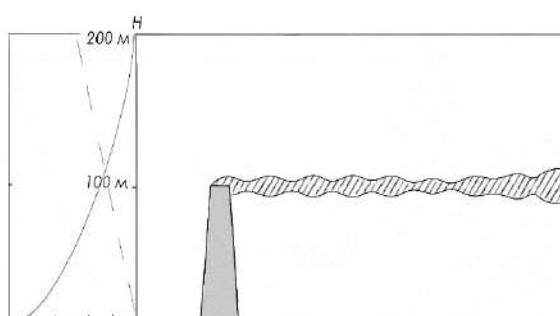


Рисунок 2.9 – «Нитевидный» поток при инверсии

При конвективном перемешивании наблюдается распространение дымовой струи в виде волны, за счет ее способности к опусканию и концентрации на определенной высоте от выхода из трубы. В изотермических

процессах дымовая струя постепенно расширяется и достигает земной поверхности на 10-20 высотах трубы в виде конуса. В случае нитевидной струи, плохо перемешивающейся с вертикальными потоками, может наблюдаться температурная инверсия. При устойчивом ветре, перемещения струи дыма на рисунках 2.6 – 2.9 соответствуют указанным характеристикам. Если слой инверсии располагается ниже источника дыма, то его перемешивание с воздухом приводит к распылению вверх, что называется приподнятой струей (см. рисунок 2.10). В случае, когда слой находится выше активных потоков, дымовая струя может приобретать задымляющий характер (см. рисунок 2.11).

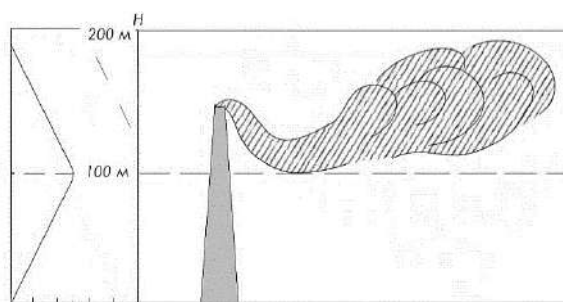


Рисунок 2.10 – «Приподнятый» поток при инверсии

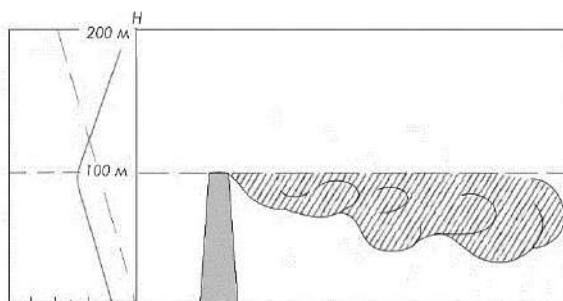


Рисунок 2.11 – «Задымляющий» поток при инверсии

В большинстве случаев такое явление происходит в период, когда наблюдается температурная инверсия в ночное время, а днем, когда подстилающая поверхность прогревается, возникают конвективные потоки, которые смешивают струю дыма с приземным воздухом. Опасный поток дыма обычно наблюдается в устойчивой атмосфере в период антициклонической деятельности. Из-за нисходящих потоков воздуха и практически отсутствия ветра струя дыма остается за "крышкой" и не может взлететь вверх. Подобные

случаи характерны в холодные месяцы года, когда возможно образование глубокой инверсии над источником дыма, как представлено на рисунке 2.12. [40]

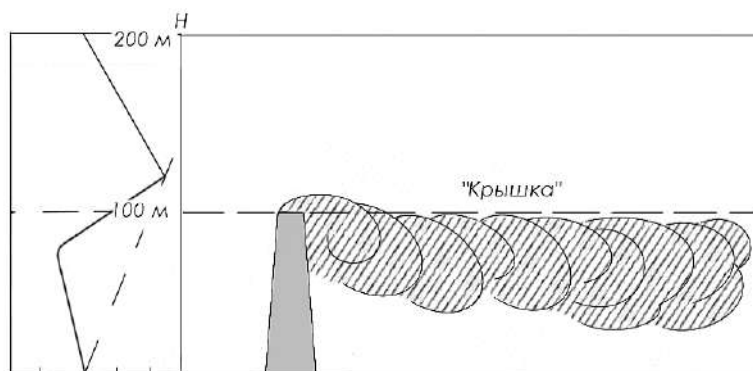


Рисунок 2.12 – «Опасный» поток при инверсии

Влажность - это количество водяных паров в воздухе, и она также играет роль в качестве воздуха. Повышенный уровень влажности может уменьшить количество переносимых по воздуху частиц за счет увеличения их размера в результате процесса гигроскопического роста. Однако высокая влажность также может привести к скоплению загрязняющих веществ у земли, поскольку относительно влажный воздух может задерживать выбросы от таких источников, как транспортные средства и промышленные предприятия.

Сухие условия также могут усугублять загрязнение воздуха за счет увеличения переноса пыли и других твердых частиц из природных и антропогенных источников. В регионах с низким уровнем влажности, таких как пустыни, пыльные бури могут вносить значительный вклад в загрязнение воздуха. [40]

Скорость ветра является важнейшей метеорологической переменной, которая влияет на рассеивание загрязняющих веществ в воздухе. Высокая скорость ветра может быстро перенести загрязняющие вещества от их источника и снизить их концентрацию в воздухе. Однако сильный ветер может также усилить перенос загрязняющих веществ от удаленных источников, таких как лесные пожары или промышленные предприятия, что может повлиять на качество воздуха в наветренных районах.

Низкая скорость ветра, с другой стороны, может привести к застою воздушных масс и скоплению загрязняющих веществ вблизи их источника. Это особенно проблематично в городских районах, где здания могут создавать "эффект каньона", задерживая загрязняющие вещества в воздушных массах на уровне улицы. Низкая скорость ветра также может усугублять температурные инверсии, что приводит к повышению концентрации загрязняющих веществ у поверхности земли.

Осадки в виде дождя или снега тоже могут существенно влиять на качество воздуха. Выпадая в атмосферу, осадки могут улавливать загрязняющие вещества, удаляя их из воздуха. Дождь также может помочь облегчить сухие условия, которые способствуют образованию пыли и твердых частиц. Однако осадки могут также увеличить перенос загрязняющих веществ в водоемы, что приводит к загрязнению окружающей среды.

Кроме того, обильные осадки могут вызвать сток загрязняющих веществ с таких поверхностей, как дороги и здания, что приведет к увеличению загрязнения воды. Ожидается, что изменение климата приведет к увеличению количества экстремальных осадков и изменению характера выпадения осадков, что будет иметь последствия для качества воздуха и воды. [41]

2.6. Состояние качества атмосферного воздуха над территориями Санкт-Петербурга и Москвы

Качество атмосферного воздуха является критически важным аспектом здоровья человека и экологии в целом. Крупные города всегда страдали от загрязнения воздуха, особенно в России, где несколько городов находятся в топ-10 списка самых загрязненных городов в мире.

Россия является одной из стран с самой высокой концентрацией атмосферных загрязнений в мире [42]. Согласно отчету ВОЗ, Россия занимает 10 место в списке смертей, связанных с загрязнением воздуха. Воскресенск, Москва, Новокузнецк, Новосибирск, Орск, Челябинск, Екатеринбург,

Красноярск и Кемерово – все эти крупные города находятся в списке самых загрязненных городов в России [43].

Одной из основных причин загрязнения атмосферного воздуха в России является неэффективность и устарелость промышленного сектора [44]. Заводы, которые были построены много лет назад, используют устаревшие и загрязняющие технологии, которые не соответствуют современным экологическим стандартам.

Кроме того, многие крупные города России испытывают проблемы с транспортным потоком и плохой инфраструктурой для перекрытия дыр в дорожной сети. В результате этого, автомобили и грузовики выпускают большое количество вредных газов в атмосферу, что приводит к заболеванию и смертности населения.

Москва является крупнейшим городом России, и ее атмосферный воздух находится под постоянным наблюдением. Согласно отчету Росгидромета, наблюдается рост концентрации вредных веществ в воздухе Москвы. В декабре 2020 года уровень загрязнения превышал нормативную в 2-3 раза. Основным источником загрязнения воздуха являются автомобили и заводы [45].

Одним из основных загрязняющих веществ в Санкт-Петербурге являются ТЧ. ТЧ представляет собой сложную смесь твердых частиц и капель жидкости, взвешенных в воздухе. ТЧ могут поступать из различных источников, включая транспорт, промышленность, строительство и природные источники, такие как пыль и лесные пожары. ТЧ связан с целым рядом проблем со здоровьем, включая респираторные и сердечно-сосудистые заболевания, рак и преждевременную смерть [46].

По данным Росприроднадзора (Федеральная служба России по надзору в сфере природных ресурсов), средняя концентрация PM10 (частиц диаметром менее 10 микрон) в Санкт-Петербурге в 2019 году составила 25 микрограммов на кубический метр, что немного ниже рекомендации ВОЗ в 20 микрограммов на кубический метр.

Другим крупным загрязнителем в Санкт-Петербурге является диоксид серы (SO_2). SO_2 - это газ, который выделяется при сжигании ископаемого топлива, в первую очередь угля и нефти. Это может вызвать проблемы с дыханием, включая бронхит, эмфизему легких и астму. В Санкт-Петербурге основным источником SO_2 является система отопления, которая в значительной степени зависит от угольных электростанций. По данным Росприроднадзора, средняя концентрация SO_2 в Санкт-Петербурге в 2019 году составила 16 микрограммов на кубический метр, что ниже предельно допустимой концентрации в России в 50 микрограммов на кубический метр.

Диоксид азота (NO_2) является еще одним загрязнителем, вызывающим озабоченность в Санкт-Петербурге. NO_2 - это газ, который в основном выбрасывается автомобилями и электростанциями. Это может вызвать проблемы с дыханием и усугубить астму. По данным Росприроднадзора, средняя концентрация NO_2 в Санкт-Петербурге в 2019 году составила 28 микрограммов на кубический метр, что ниже предельно допустимой концентрации в России в 40 микрограммов на кубический метр [47].

Источники загрязнения воздуха в Санкт-Петербурге разнообразны и сложны. Промышленная деятельность, транспорт и системы отопления - все это усугубляет проблему. Промышленная деятельность, включая переработку нефти и газа, а также производство химических веществ и металлов, являются основными источниками загрязнения воздуха. Транспорт является еще одним значительным источником загрязнения, особенно выхлопными газами дизельных двигателей. Городская система отопления также выделяет большое количество загрязняющих веществ, особенно в зимние месяцы, когда для обогрева зданий используются угольные котлы.

Одним из уникальных факторов, способствующих загрязнению воздуха в Санкт-Петербурге, является география города. Город расположен в низменности, окруженной холмами, которые задерживают загрязняющие вещества в нижних слоях атмосферы. Это известно как инверсионный слой, который может привести к образованию смога и ухудшению качества воздуха.

Кроме того, Санкт-Петербург расположен на берегу Балтийского моря, что может привести к переносу морской соли и других загрязняющих веществ ветром вглубь страны.

Российское правительство предприняло шаги по улучшению качества воздуха в Санкт-Петербурге. В 2017 году в городе была введена зона с низким уровнем выбросов, которая ограничивает въезд транспортных средств с высоким уровнем выбросов в центр города. Зона занимает площадь в 43 квадратных километра и затрагивает более 400 000 транспортных средств. Кроме того, правительство инвестировало в модернизацию системы отопления с целью увеличения использования природного газа и сокращения использования угля. [48]

В заключение следует отметить, что состояние качества атмосферного воздуха над Санкт-Петербургом является сложным вопросом. Промышленная деятельность города, транспорт и системы отопления - все это усугубляет проблему. Твердые частицы, диоксид серы и диоксид азота являются основными загрязнителями.

ГЛАВА 3. МОДЕЛЬ ENVIRO-HIRLAM.

3.1. История создания модели Enviro-HIRLAM

В последние десятилетия быстро развивается и растет новая область атмосферного моделирования - химическое прогнозирование погоды. Однако в большинстве современных исследований эта область все еще рассматривается в упрощенной концепции автономного запуска моделей атмосферного химического переноса с оперативными данными численного прогноза погоды в качестве драйвера. Недавно были предложены новые концепция и методология, рассматривающие "химическую погоду" как двусторонне взаимодействующие нелинейные метеорологические и химические/аэрозольные процессы динамики атмосферы. Первые попытки построения онлайн-моделей метеорологии и загрязнения воздуха для экологических приложений были предприняты в 1980-х годах. Для климатических приложений первые модели химической связи с климатом были разработаны и использованы в 1990-х годах. Более подробный обзор истории и современного опыта онлайн-интегрированного метеоролого-химического моделирования, важность различных цепочек механизмов обратной связи для метеорологических процессов и процессов атмосферного состава обсуждаются для американской и европейской моделей. Расширили возможности применения связанных моделей для "биологической погоды", определяемой как "краткосрочное состояние и изменение концентраций биоаэрозолей", в частности для моделирования и прогнозирования пыли.

Интеграция мезометеорологических моделей и моделей атмосферных аэрозолей и атмосферного химического переноса в режиме онлайн дает возможность использовать все метеорологические трехмерные поля в модели атмосферного химического переноса на каждом временном шаге и учитывать нелинейные обратные связи загрязнения воздуха (например, атмосферных аэрозолей) на метеорологические процессы/климатический форсинг и затем на химический состав атмосферы. Этот очень перспективный путь для будущих

систем моделирования атмосферы (как часть и шаг к моделированию системы Земли) приведет к новому поколению бесшовных связанных моделей для метеорологического, химического и биохимического прогнозирования погоды. Бесшовный подход для интегрированных систем прогнозирования "одной атмосферы" метеорология-химия-аэрозоль анализируется в рамках COST Action ES1004 EuMetChem, а обзор текущего состояния онлайн-моделей химии-метеорологии и потребности в дальнейшем развитии были опубликованы в Zhang (2008), WMO (2016), Baklanov et al. (2017) и Sokhi et al. (2017).

Методология реализации предложенной интегрированной концепции была продемонстрирована на европейском примере интегрированной системы моделирования Enviro-HIRLAM (Environment - High Resolution Limited Area Model). Опыт первых попыток сообщества HIRLAM включить загрязняющие вещества в модель ЧПП и новаторских разработок онлайн-модели сопряженной метеорологии и загрязнения окружающей среды новосибирской научной школы был активно использован при разработке системы моделирования Enviro-HIRLAM. Enviro-HIRLAM разработана как полностью онлайн-интегрированная система моделирования численного прогнозирования погоды и атмосферного химического переноса для исследований.

Enviro-HIRLAM - это полностью онлайн-объединенная (интегрированная) численного прогнозирования погоды и атмосферного химического переноса система моделирования для исследования и прогнозирования метеорологической, химической и биологической погоды (см. схемы на рис. 3.1). Система моделирования была первоначально разработана DMI и в дальнейшем совместно с другими партнерами, а в настоящее время она включена европейским консорциумом HIRLAM в качестве базовой системы в химическую ветвь HIRLAM. Это была первая в Европе мезомасштабная онлайн-модель, учитывающая двустороннюю косвенную обратную связь между метеорологией и химией/аэрозолями.

3.2. Структура модели

Были реализованы основные этапы разработки модели, включая (1) вложение моделей для высокого разрешения, (2) доказанное разрешение структуры планетарного пограничного слоя (ППС) и приземного слоя, (3) урбанизацию модели ЧПП, (4) улучшение схем адвекции, (5) изобретения и модели выбросов, теории и модели, (6) реализация механизмов газофазной химии, (7) реализация аэрозольной динамики, (8) реализация механизмов аэрозольной обратной связи.

Первая версия была основана на численном прогнозировании погоды-модели DMI-HIRLAM с интегрированными в режиме онлайн переносом и рассеиванием загрязняющих веществ, химией, осаждением и прямыми эффектами и более поздней аэрозольной (только для частиц серы) динамикой. Чтобы сделать модель пригодной для прогнозирования химической погоды в городских районах, метеорологическая часть была улучшена путем внедрения параметризации городских подслоев. Динамическое ядро модели было улучшено путем добавления локально сохраняющей массу полу-Лагранжевой схемы численной адвекции, что повышает точность прогноза и позволяет проводить более длительные прогоны.

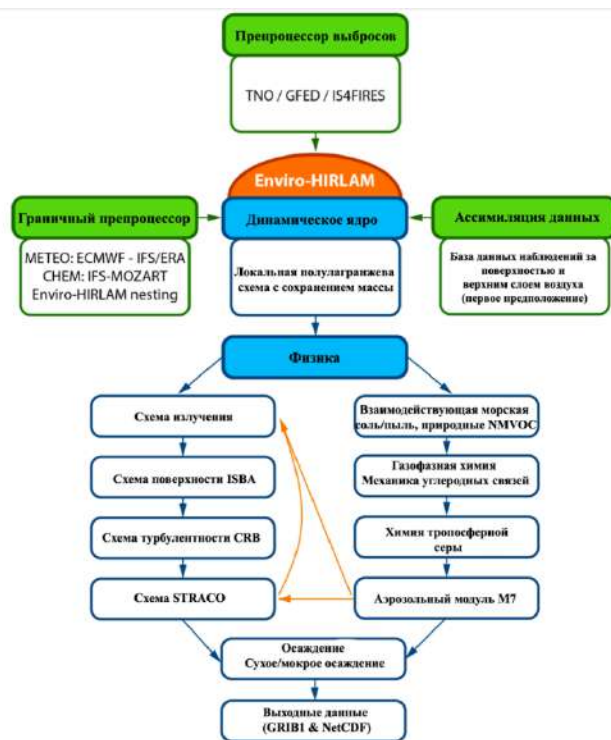


Рисунок 3.1 – Схема системы моделирования Enviro-HIRLAM [49]

Химия атмосферы включает в себя:

1. Тропосферный цикл серы:

Простой модуль химии цикла серы в тропосфере в программе Enviro-HIRLAM, используемый для долгосрочных прогонов (до 1 года), основан на механизме цикла серы в котором рассматриваются три прогностических вида: диметилсульфид (DMS), диоксид серы (SO_2) и сульфат (SO_x).

Газофазная химия:

Схема газофазной химии состоит из наборов химических схем, начиная от простых схем для химических прогнозов погоды и заканчивая очень сложными схемами для тематических исследований.

2. Химические решения:

Расчет временной эволюции газофазной химии требует численного интегрирования набора обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ) и является одной из самых дорогостоящих операций, выполняемых в фотохимической модели решетки. Уравнения для фотохимического производства и потерь требуют больших вычислительных затрат, поскольку они образуют жесткую численную систему.

3. Скорость фотолиза:

Скорость фотолиза определяется как функция различных метеорологических и условных параметров. Скорости для конкретных условий определяются путем интерполяции из массива заранее определенных значений.

К примеру, а скорость фотолиза может существенно влиять наличие облаков. Оптическая глубина облаков определяется с помощью случайного наложения.

4. Гетерогенная химия:

Многие газофазные виды растворимы в воде, а сульфат и аммиак вместе с водой участвуют в бинарной/терминальной нуклеации. Чтобы учесть эти процессы, в ЧПП-Chem-Liquid включен упрощенный механизм жидкофазного равновесия с самыми основными равновесиями. ЧПП-Chem-Liquid - это модель термодинамического равновесия. Этот модуль равновесия решается с помощью аналитического метода итераций равновесия.

При образовании, динамике и осаждении аэрозолей рассматриваются два типа частиц: нерастворимые и смешанные (водорастворимые) частицы. Частицы разделены на семь классов в зависимости от размера частиц и растворимости с помощью "псевдомодального" подхода. Четыре класса используются для представления смешанных частиц, еще три класса - для нерастворимых.

Включены четыре преобладающих типа аэрозолей: черный углерод (ЧУ), первичный органический углерод (ОС), сульфаты, минеральная пыль и морская соль.

Потоки сухого осаждения газов и аэрозолей (как для количественных и массовых концентраций) рассчитываются из аэродинамического, квазиламинарного пограничного слоя как произведение концентрации в приземном слое и потока сухого осаждения локальности.

В модели существует несколько вариантов влажного осаждения:

В первой версии использовалась зависимость от размера аэрозоля параметризация Бакланова и Сёренсена (2001). В последней версии для расчета мокрого осаждения также применяются фиксированные параметры поглощения,

зависящие от размера и состава, которые отличаются для стратиформных и конвективных облаков.

Модули выбросов обрабатываются по-разному, поскольку некоторые из них представляют собой чистые наборы данных, полученные из наземных и спутниковых наблюдений. Модель включает в себя антропогенные, сжигание биомассы (Дикие пожары) и естественные потоки выбросов как газов, так и аэрозолей. Другие интерактивно разрабатываются в процессе интеграции модели и зависят от метеорологических условий на текущем временном шаге и землепользования, почвенно-растительного покрова или типов водной поверхности.

Механизмы обратной связи с аэрозолями делятся на 2 типа:

Прямые и полупрямые эффекты:

Прямые и полупрямые эффекты реализуются путем модификации радиационной схемы Савиярви с внедрением новых быстрых аналитических коротковолновых (SW) и длинноволновых (LW) аэрозольных коэффициентов пропускания, отражения и поглощения (см. рисунок 2а и 2б).

Первый и второй косвенные эффекты:

Прогностические аэрозольные поля связаны непосредственно с физическими и микрофизическими свойствами облаков. Количество капель жидкого облака рассчитывается на основе размера, количества и растворимости аэрозолей, а поле пересыщения подсеточного слоя STRACO используется в качестве основы для расчета зарождения капель.

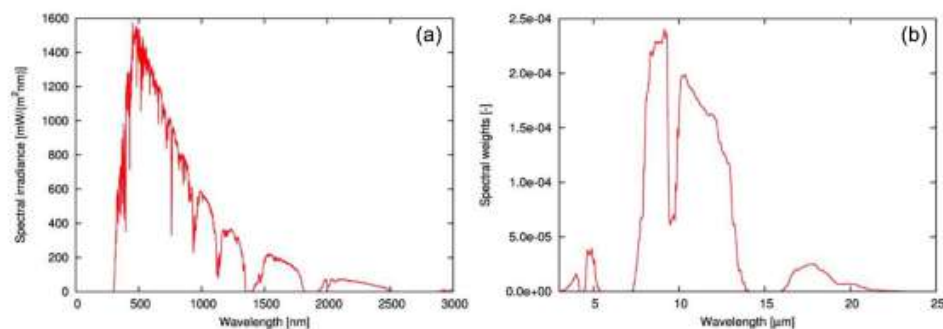


Рисунок 3.2 – (а)типичный коротковолновый спектр (SW), используемый для расчета средних оптических свойств коротковолновых аэрозолей (SW), (б)

спектральные веса, используемые для расчета средних длинноволновых аэрозольных оптических свойств (LW).

Представление городских территорий в Enviro-HIRLAM включает следующие аспекты и процессы:

1. уменьшение масштаба модели, включая увеличение вертикального и горизонтального разрешения и методы гнездования;
2. модифицированные классификации городского землепользования с высоким разрешением, параметризация и алгоритмы для параметров шероховатости в городских районах на основе морфологического метода;
3. специальная параметризация городских потоков в мезомасштабной модели;
4. моделирование/параметризация метеорологических полей в городском подслое;
5. расчет высоты городского смещения на основе прогностических подходы.

Возможные области применения интегрированной онлайн системы моделирования Enviro-Система моделирования HIRLAM включает следующее: химическое прогнозирование погоды, долгосрочная оценка качества и химического состава воздуха, прогноз погоды (например, в городских районах, суровые погодные явления), прогнозирование переноса пыли и биоаэрозолей, моделирование изменения климата, исследования влияния изменения климата на загрязнение атмосферы в различных масштабах, антропогенное воздействие на атмосферные процессы, модификация погоды, геоинженерия, загрязнение при извержениях вулканов, песчаные и пыльные бури, последствия ядерных взрывов, моделирование готовности к другим чрезвычайным ситуациям. [50]

В связи с тем, что в данной работе исследуется случай загрязнения атмосферы диоксидом серы, особый интерес представляет модуль химического цикла тропосферной серы (TSCCM). TSCCM в Enviro-HIRLAM используется для долгосрочных прогонов (до одного года). Он основан на механизме цикла серы [50].

Рассматриваются три прогностических вида. Первый – диметилсульфид (DMS). Второй - диоксид серы (SO_2). И третий - сульфат. Механизм включает окисление SO_2 и DMS. Этот процесс обусловлен реакциями гидроксила (OH) и DMS с нитратными радикалами (NO_3) в газовой фазе.

Химия гетерогенной водной фазы представлена реакциями окисления SO_2 , H_2O_2 , и O_3 . Учет эффекта растворения SO_2 (в водной фазе) описывается законом Генри. Для задания трехмерных полей окислителей OH, H_2O , NO_2 , и O_3 используется глобальная химико-транспортная модель для OZone And Related chemical Tracers MOZART [51].

Сульфат, образовавшийся в газовой фазе, учитывается как газ. Он может конденсироваться на уже существующих аэрозолях. Кроме того, он может быть зароден модулем аэрозольной микрофизики, так называемым модулем M7 [52]. Важно отметить, что сульфат, образующийся в облаках, накапливается на аэрозолях крупной фракции и на уже существующих скоплениях. Модули M7 и TSCCM используются совместно. Это позволяет снизить вычислительные затраты, и является относительно простым.

Модуль газовой химии Carbon Bond Mechanism version (CBM-Z) и модуль M7 не используются вместе по нескольким причинам. Первая причина заключается в том, что вторичные органические аэрозоли не включены в M7. Вторая причина связана с достаточно дорогими вычислительными затратами для совместного использования модулей CBM-Z и M7 как для состава атмосферы, так и для прогнозирования погоды [53].

3.3. Процесс моделирования

Перед началом процесса имитации модели необходимо пройти этап предварительной обработки. Он включает в себя извлечение и подготовку необходимых данных для моделирования. Для извлечения необходимых файлов входных данных из хранилища данных (система архива данных в ECMWF) необходимо написать скрипт на языке python, выполнив ряд технических шагов.

Прежде всего, важно создать временный каталог, в который будет извлечен файл данных, и указать точное имя такого файла (имя файла состоит из: года, месяца, дня, часа, длины прогноза во времени UTC и параметра извлекаемых данных). Кроме того, важно указать необходимые сроки получения данных. Следующий шаг - правильный выбор опций для запроса в Метеорологической архивно-поисковой системе (MARS). Существует несколько вариантов данных реанализа. Для моделирования Enviro-HIRLAM в качестве исходных данных для запуска модели требуется атмосферный реанализ пятого поколения ECMWF (ERA-5) и реанализ Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS). ERA-5 предоставляет большое количество океанических, атмосферных и климатических переменных. Она покрывает Землю сеткой с горизонтальным разрешением 30x30 км и разрешает атмосферу на 137 вертикальных уровнях. Высота составляет от поверхности до 80 км. Необходимые входные данные, связанные с метеорологией, включают: температуру поверхности моря (SST) и метеорологические начальные и граничные условия (ICs/BCs). Извлекаются следующие параметры: stl1 (температура почвы на уровне 1, [K]), ci (доля площади морского льда, [0 - 1]), lsm (маска суша-море, [0 - 1]), sst (температура поверхности моря, [K]). Метеорологические ICs/BCs включают следующие извлеченные параметры: q (удельная влажность, [кг/кг]), lnsr (логарифм поверхностного давления, безразмерный), z (геопотенциал, [м²/с²]), t (температура воздуха, [K]), u (компонент скорости ветра, [м/с]), v (компонент скорости ветра, [м/с]). CAMS предоставляет 3-мерные поля, согласованные по времени, которые включают химические виды (аэрозоль и парниковые газы, ПГ). В этом случае она делится на таблицы данных AER (аэрозоли) и GRG (газы). AER включает следующие параметры: aermr04 (пылевой аэрозоль 0.03 - 0.55 μm коэффициент смешивания [кг/кг]), aermr05 (пылевой аэрозоль 0.55 - 0.9 μm коэффициент смешивания [кг/кг]), aermr06 (пылевой аэрозоль 0.9 - 20 μm [кг/кг]), aermr07 (коэффициент смешивания аэрозоля гидрофильного органического вещества [кг/кг]), aermr08 (коэффициент смешивания аэрозоля гидрофобного органического вещества [кг/кг]), aermr09 (коэффициент

смешивания аэрозоля гидрофильного технического углерода [кг/кг]), aermr10 (коэффициент смешивания аэрозоля гидрофобного технического углерода [кг/кг]), aermr11 (коэффициент смешивания аэрозоля сульфатов [кг/кг]). GRG включает следующие параметры: o3 (озон O_3 [кг/кг]), so2 (диоксид серы SO_2 [кг/кг]), no2 (диоксид азота NO_2 [кг/кг]), no (монооксид азота NO [кг/кг]), h2o2 (перекись водорода H_2O_2 [кг/кг]), oh (гидроксильный радикал OH [кг/кг]), no3 (нитратный радикал NO_3 [кг/кг]), ho2 (гидропероксильный радикал HO_2 [кг/кг]), dms (диметилсульфид [кг/кг]).

Следующим параметром для извлечения является "класс". Это классификация ECMWF для данных. Класс для данных ERA-5 определяется как "ea". Для CAMS он определен как "cm". Опция "dataset" - это тип набора данных. В данном случае он определен как ERA-5. Опция "дата" представлена годом, месяцем и днем извлеченных данных. Она определяется в следующем формате: ГГГГ-ММ-ДД. Опция: "exrver" представляет собой уникальный код (версию). Он присваивается для каждого прогона модели ECMWF. Опция "grid" определяет целевую сетку. Опция "level list" включает список вертикальных уровней, на которых будут извлечены данные. Опция "level type" описывает тип вертикальных уровней моделирования. Опция "param" представляет собой определение ID извлекаемых параметров. Опция "area" описывает необходимую подобласть извлекаемых данных. Опция "rotation" определяет положение южного полюса повернутой сетки в виде широты/долготы в градусах. Опция "шаг" - это шаг по времени для прогноза. Опция "stream" определяет систему прогнозирования. Опция "time" определяет время данных в следующем формате: ЧЧ-ММ. Опция "type" выбирает между изображениями, наблюдениями или полями, а также определяет некоторые допустимые оставшиеся ключевые слова запроса. Опция "target" определяет файл, в который данные должны быть записаны после получения или манипулирования.

Теперь рассмотрим тип данных наблюдения. Данные наблюдений представлены в формате Binary Universal Form for the Representation of meteorological data (BUFR), с обычным типом наблюдений. Файл данных BUFR

содержит следующие опции, извлекающие необходимые данные через запрос MARS. Первая опция "type" имеет то же значение, что и для данных реанализа (см. выше в этом разделе) Опция "OBSTYPE" описывает подтип для наблюдения (код BUFR) или, для изображений, спутниковый канал. В данном случае "OBSTYPE" равен "CONVENTIONAL". Параметры "Area", "Date", "Time" и "Target" имеют то же значение, что и для данных реанализа (см. выше в этом разделе).

Извлечение данных для прогонов модели Enviro-HIRLAM основано на системе таблиц. Для того чтобы можно было распаковать необходимые элементы из данных наблюдений, в таблицах приводится список ключей. Все данные наблюдений представлены в формате BUFR [54].

ГЛАВА 4. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА НА ТЕРРИТОРИЯХ МЕГАПОЛИСОВ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ.

В результате работы был проведен комплексный анализ двух периодов года (летний и зимний) над мегаполисами Российской Федерацией (см. приложение). В данной главе рассмотрим период с 07.08.2010 по 09.08.2010 над территориями Санкт-Петербурга и Москвой (см. рисунок 4.1).

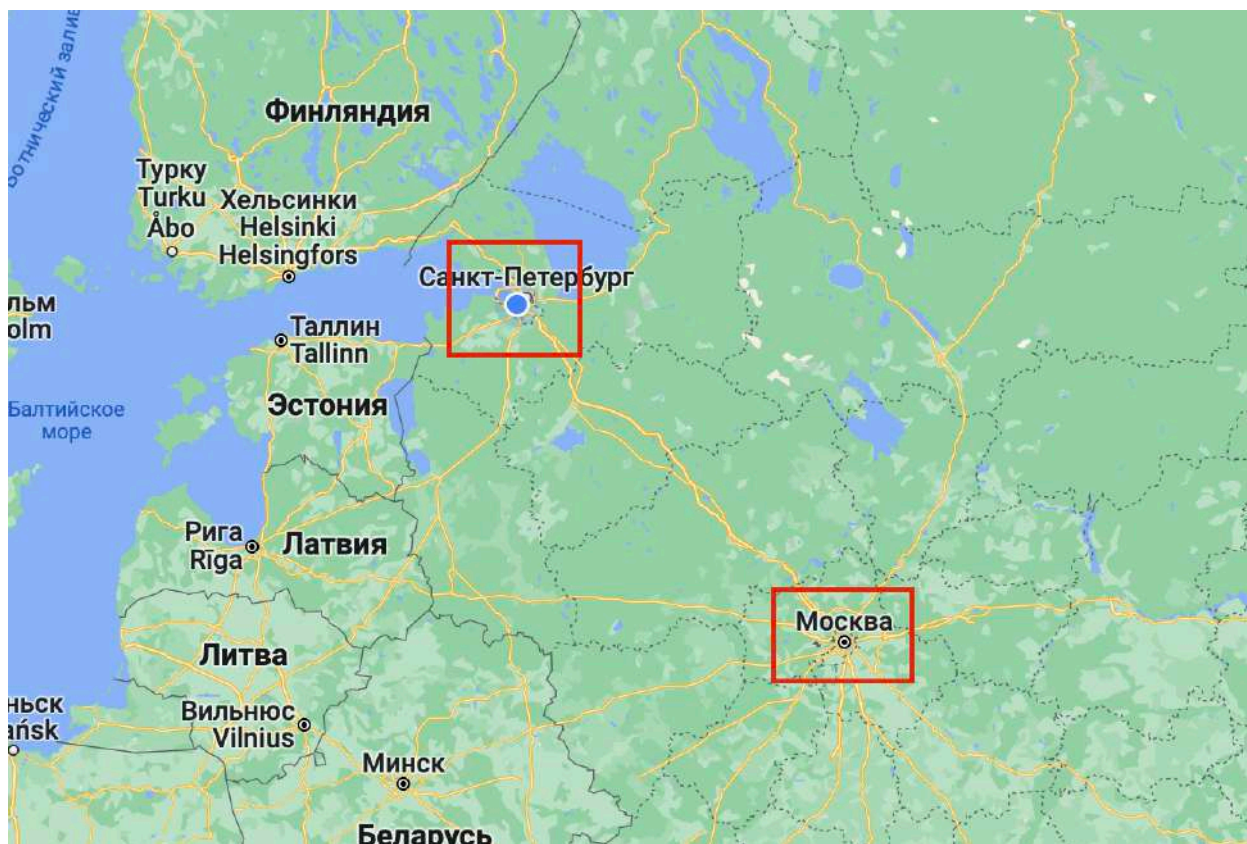


Рисунок 4.1 – Исследуемые территории

В первой декаде августа на большей части европейской территории России завершается самая сильная и продолжительная тепловая волна за всю историю инструментальных метеорологических наблюдений. Тепловая волна началась в конце июня, температура не снижалась до середины августа 2010 года, легко устанавливая новые рекорды дневной, месячной и сезонной жары. Всего за восемь дней августа в Москве было установлено шесть дневных рекордов жары и трижды побит месячный рекорд жары.

Также проблемой этого лета стали природные лесные пожары, густой и едкий дым которых окутал несколько регионов европейской части России. Особенно тяжело приходится тем, кто находится между крупными очагами лесных пожаров, где высокая задымленность сохраняется независимо от направления ветра. Восточные ветры, дувшие в последнее время в центральной части Европейской России, отнесли дым на запад, распространив дымку на дальневосточные регионы Беларуси и Новгородскую область. В Москве дымка сохраняется с 6го по 9е числа августа, снижая видимость до нескольких сотен метров в вечерние, ночные и утренние часы. Еще хуже ситуация на востоке и юго-востоке Московской области, где сплошная дымовая завеса сохраняется с конца июля.

Если в районах к западу от Москвы ситуация с дымом может улучшиться при южном, юго-западном, западном или северо-западном ветре, то для восточных и юго-восточных регионов, а также соседних районов европейской части России. Пожары и, соответственно, дым, скорее всего, сохранятся до конца месяца.

Причиной засухи являются атмосферные процессы, которые поддерживают мощный антициклогенез в тропосфере над европейской частью России. Эти механизмы плохо изучены, что делает прогнозирование долгосрочных тенденций очень сложным, если не невозможным. Адвекция теплого воздуха на больших высотах настолько сильна, что геопотенциал H500 над Москвой 08.08.2010 года утром составил 593 дам, а температура T850 - +23,0°C. Эти значения, скорее всего, являются пиковыми, так как мощный антициклон, блокирующий воздух на больших высотах, с 09.08.2010 дня начал разрушаться. 11-12 августа высотная ложбина с запада оказала влияние на центральные регионы, принеся не только некоторое облегчение от жары, но и увеличив вероятность кратковременных гроз. Однако в последующие дни с Балкан распространился еще один высотный гребень, поэтому с жара спала только в конце следующей недели.

Сокращение светового дня и увеличение продолжительности ночи должны способствовать ослаблению жары, но этот фактор не работает. Температурные инверсии (см. рисунок 4.2) в мощном высотном антициклоне также являются проблемой, препятствующей рассеиванию дыма. Однако, с ослаблением антициклона последовало постепенное разрушение этого слоя и улучшение экологических условий. [55]

PRES hPa	HGHT m	TEMP C	DWPT C	RELH %	MIXR g/kg	DRCT deg	SKNT knot	THTA K	THTE K	THTV K
1001.0	200	23.0	19.3	80	14.28	0	0	296.1	337.4	298.6
1000.0	199	23.0	20.1	84	15.05	0	0	296.1	339.6	298.8
967.0	494	31.1	17.5	44	13.17	155	12	307.2	347.2	309.7
966.0	503	31.4	17.4	43	13.11	155	12	307.6	347.5	310.0
957.0	586	30.8	16.6	42	12.59	155	14	307.8	346.2	310.2
938.0	763	29.6	15.0	41	11.53	170	12	308.4	343.6	310.5
925.0	887	28.8	13.8	40	10.83	160	12	308.8	342.0	310.8

Рисунок 4.2 – Данные радиозондирования Москвы за 08.08.2010 00 UTC [55]

Мы видим, что температура до высоты около 500 метров повышается (на высоте 503 м +31,4°C, тогда как у поверхности земли +23°C).

Далее была проведена комплексная оценка загрязнения. На рисунках 4.3 - 4.8 представлены синоптическая ситуация и спутниковое изображение исследуемых территорий за период 07-09 августа 2010 года.

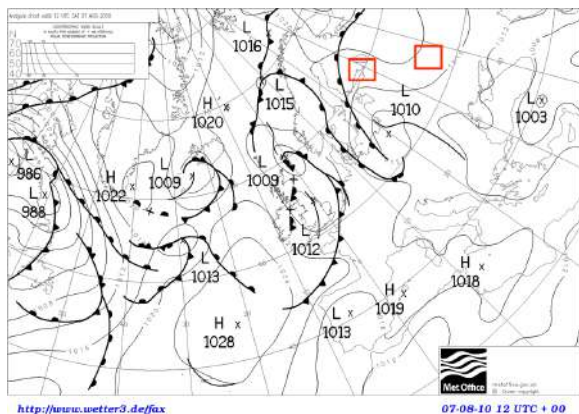


Рисунок 4.3 – Синоптическая карта
07.08.2010 г. 12 UTC

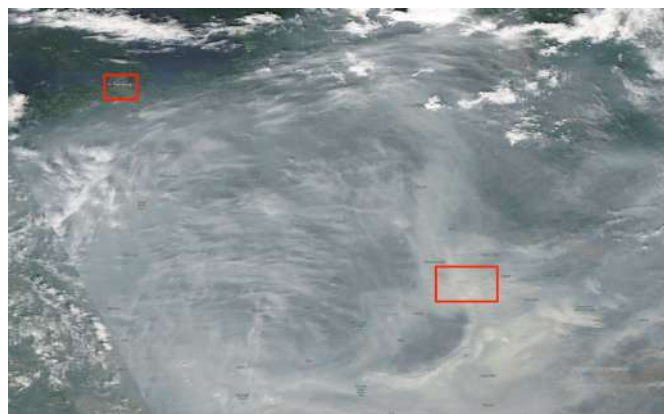


Рисунок 4.4 – Спутниковый снимок
07.08.2010 г. 12 UTC

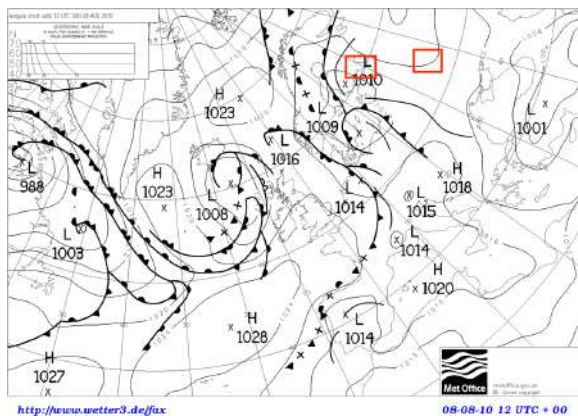


Рисунок 4.5 – Синоптическая карта
08.08.2010 г. 12 UTC

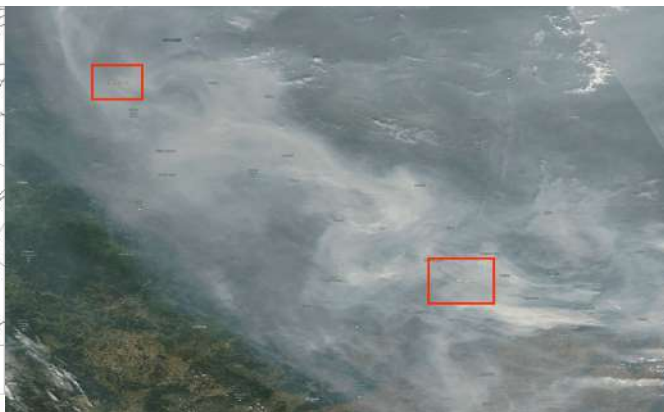


Рисунок 4.6 – Спутниковый снимок
08.08.2010 г. 12 UTC

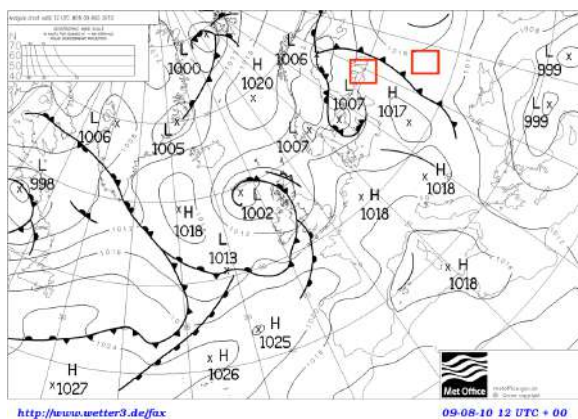


Рисунок 4.7 – Синоптическая карта
09.08.2010 г. 12 UTC

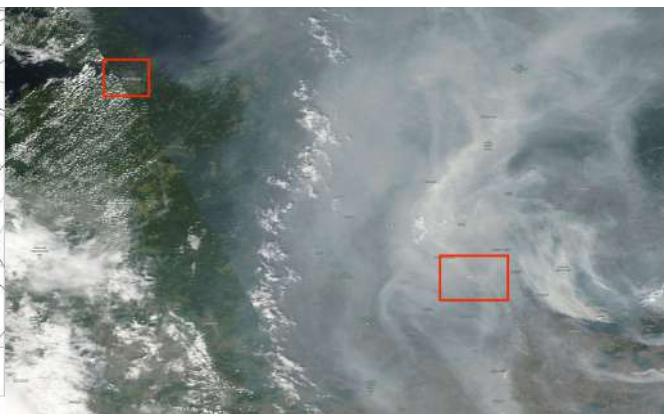


Рисунок 4.8 – Спутниковый снимок
09.08.2010 г. 12 UTC

Исходя из полученных синоптических карт, мы видим, что Санкт-Петербург и Москва находятся под влиянием блокирующего антициклона. По спутниковым изображениям мы видим, что над исследуемыми регионами отсутствует облачность, что является доказательством наличия антициклона. Также, был проведен расчет скорости и направления ветра за данный период при помощи модели Enviro-HIRLAM на рисунках 4.9-4.11.

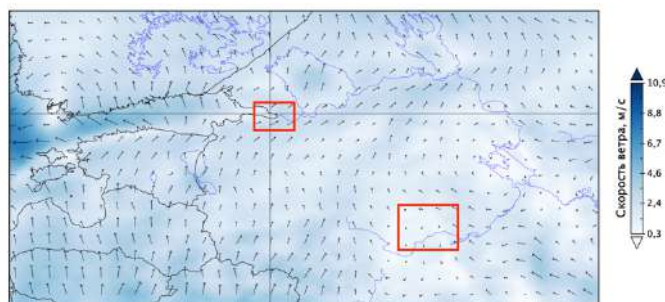


Рисунок 4.9 – Результат моделирования скорости и направления ветра
07.08.2010 12 UTC

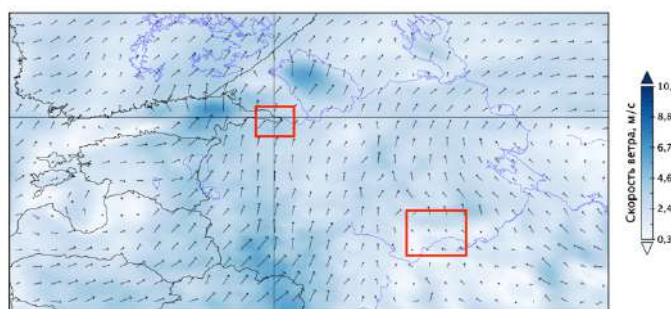


Рисунок 4.10 – Результат моделирования скорости и направления ветра
08.08.2010 12 UTC

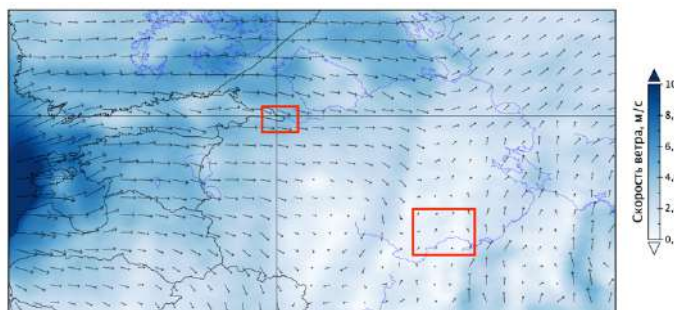


Рисунок 4.11 – Результат моделирования скорости и направления ветра
09.08.2010 12 UTC

В данный период наблюдался слабый ветер 1-3 м/с, что способствует накоплению и распространению загрязняющих веществ. Также в Москве преобладал ветер юго-восточных направлений. Под конец срока наблюдается усиление ветра над Санкт-Петербургом в связи с ослабеванием антициклона и понижением давления, в следствии чего, прихода циклона. (см. рисунки 4.12 и 4.13).

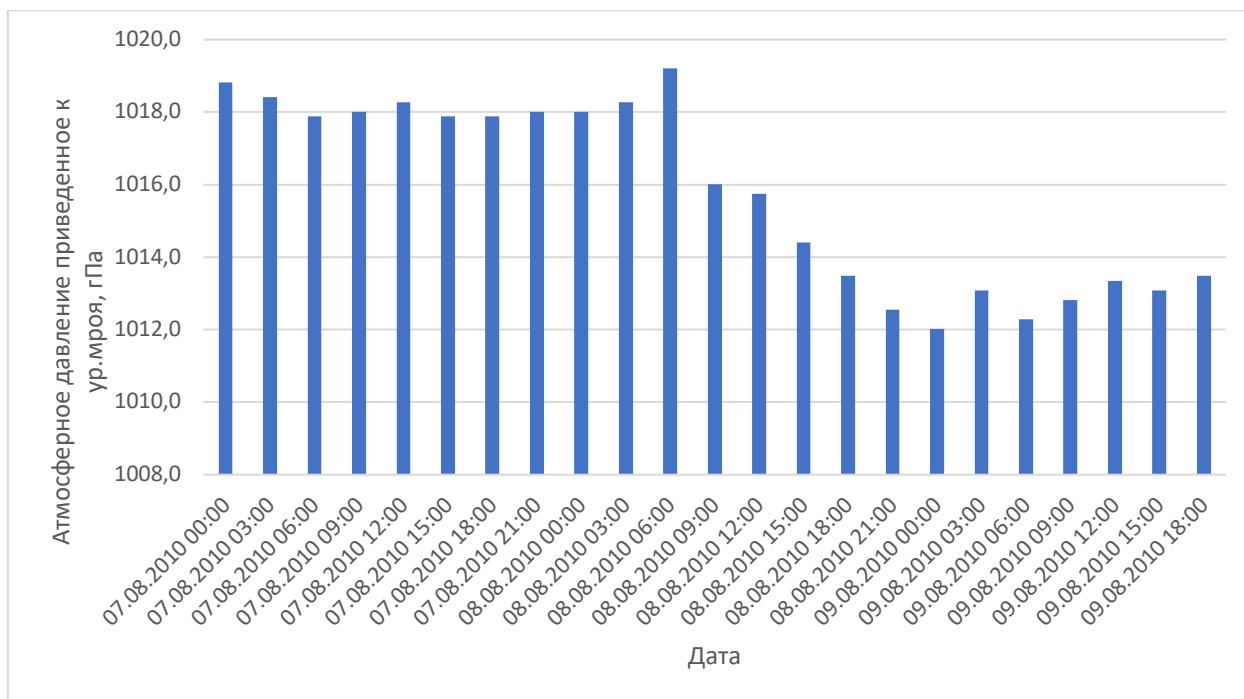


Рисунок 4.12 – Значения атмосферного давления над Санкт-Петербургом в период 07-09 августа 2010 г

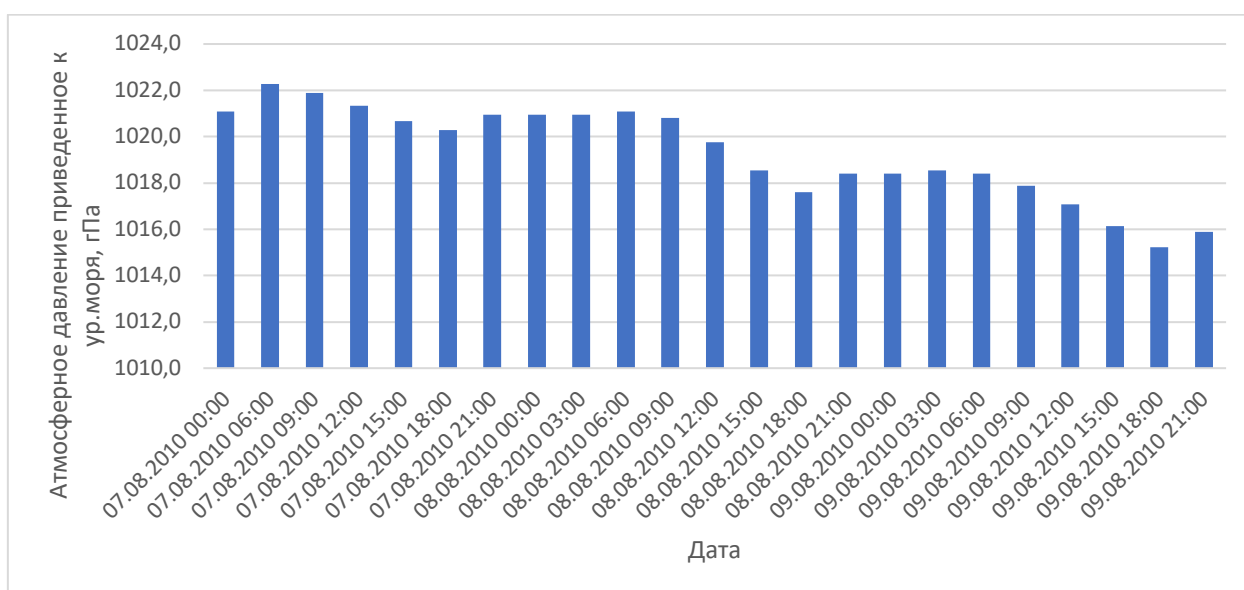


Рисунок 4.13 – Значения атмосферного давления над Москвой в период 07-09 августа 2010 г

Над двумя исследуемыми территориями наблюдалась не только температурная инверсия, но и высокие значения температуры воздуха у земли (см. рисунки 4.14 и 4.15).

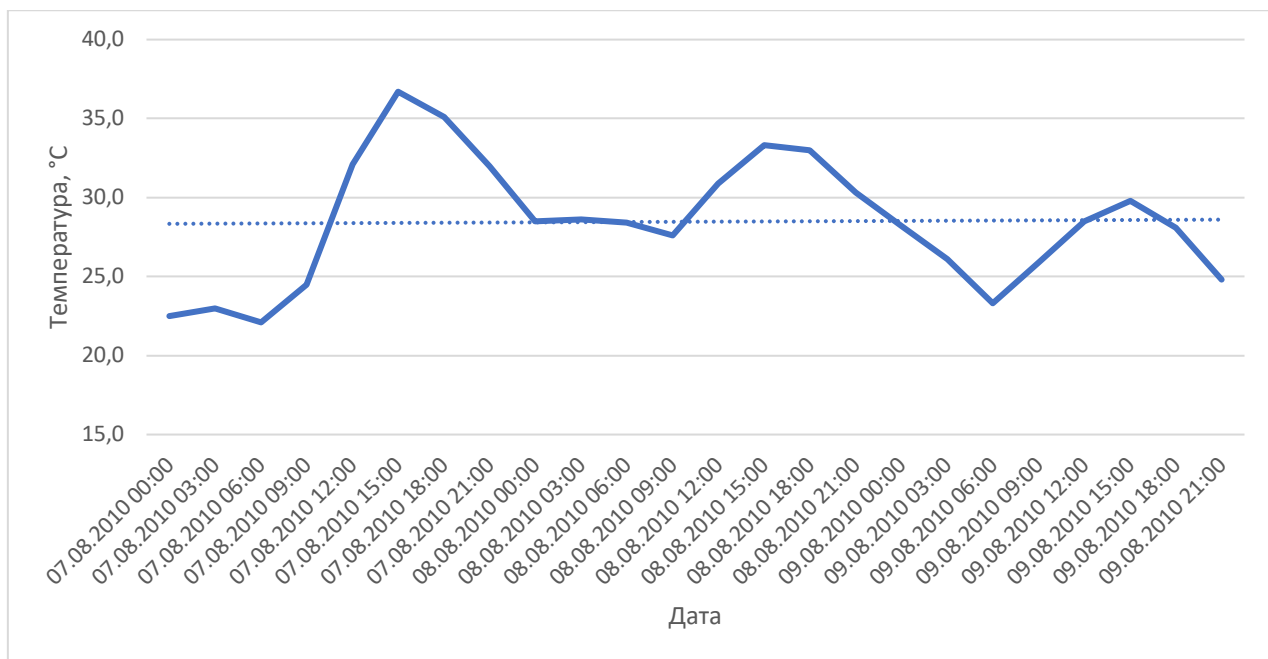


Рисунок 4.14 – Значения температуры воздуха над Санкт-Петербургом в период 07-09 августа 2010 г

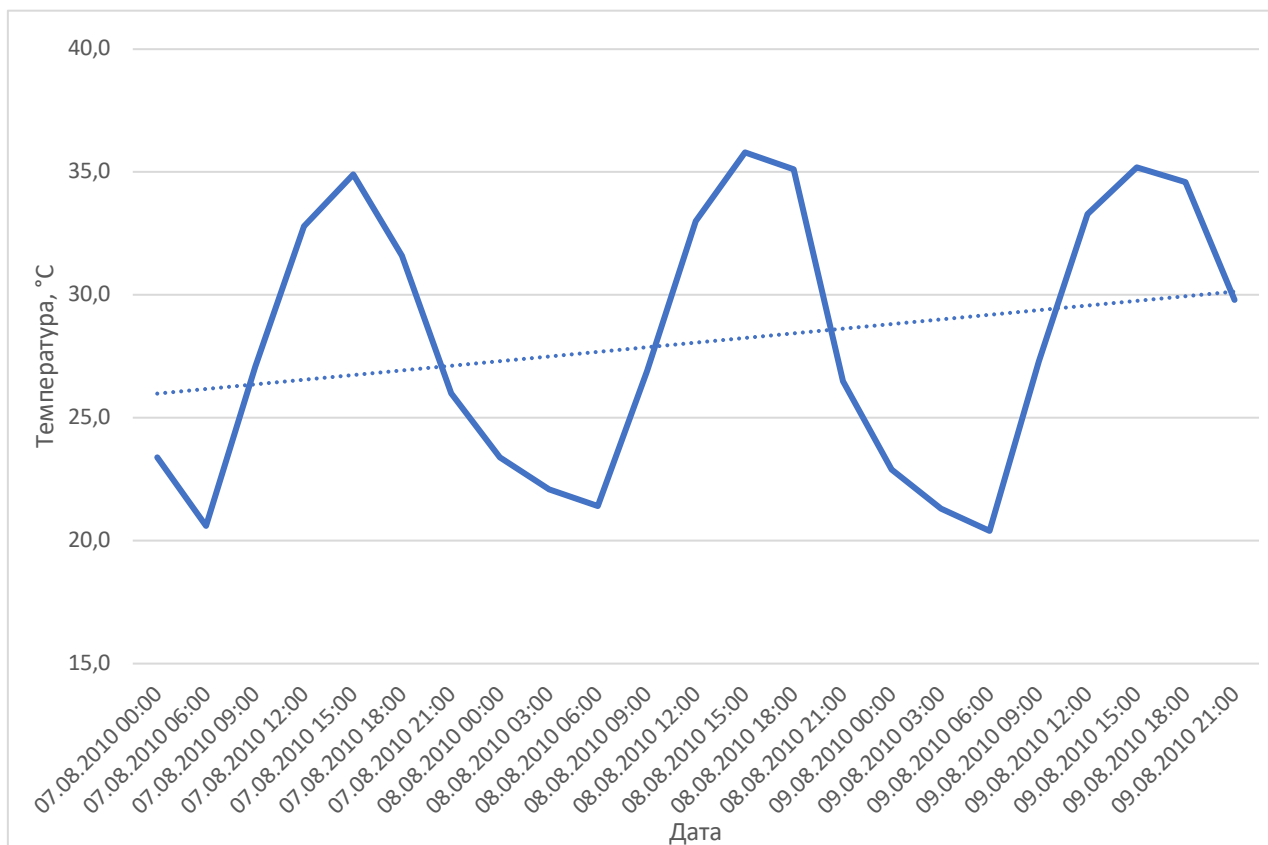


Рисунок 4.15 – Значения температуры воздуха над Москвой в период 07-09 августа 2010 г

На полученных графиках ярко выражен контраст температур в дневное и ночное время суток. Однако тенденция над обеими территориями идет вверх.

Все вышеописанные явления являются благоприятными условиями для накопления и распространения таких загрязняющих веществ как: O_3 , SO_2 , NO_2 . В доказательство тому был проведен анализ химической составляющей атмосферного воздуха, ниже прилагаются изображения, полученные в результате моделирования Enviro-HIRLAM в период с 7 по 9 августа 2010 года.

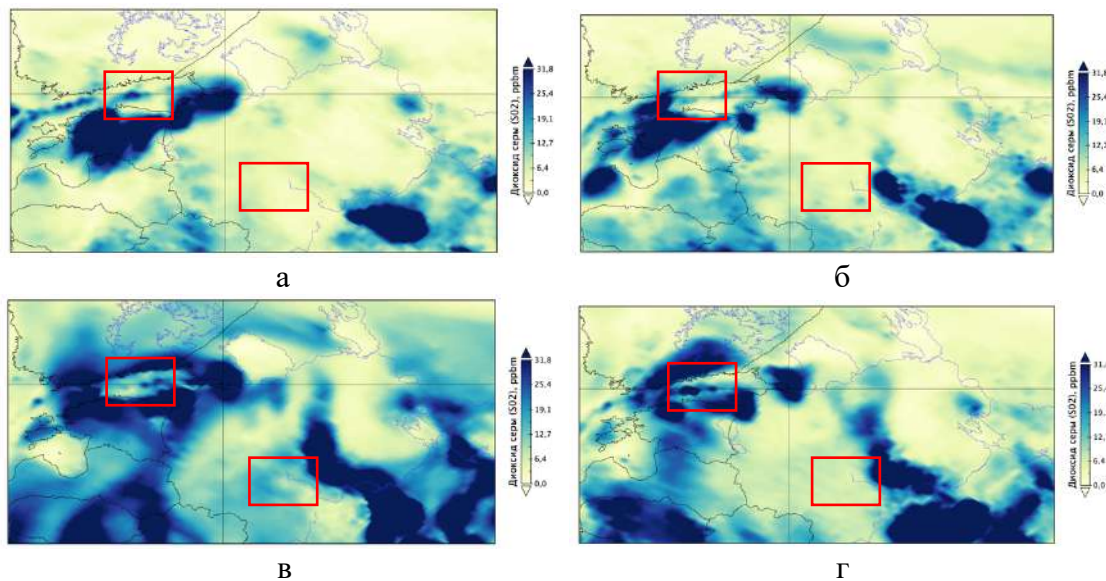


Рисунок 4.16 – Распространение диоксида серы 07.08.2010 года: (а) 00 UTC, (б) 06 UTC, (в) 12 UTC, (г) 18 UTC

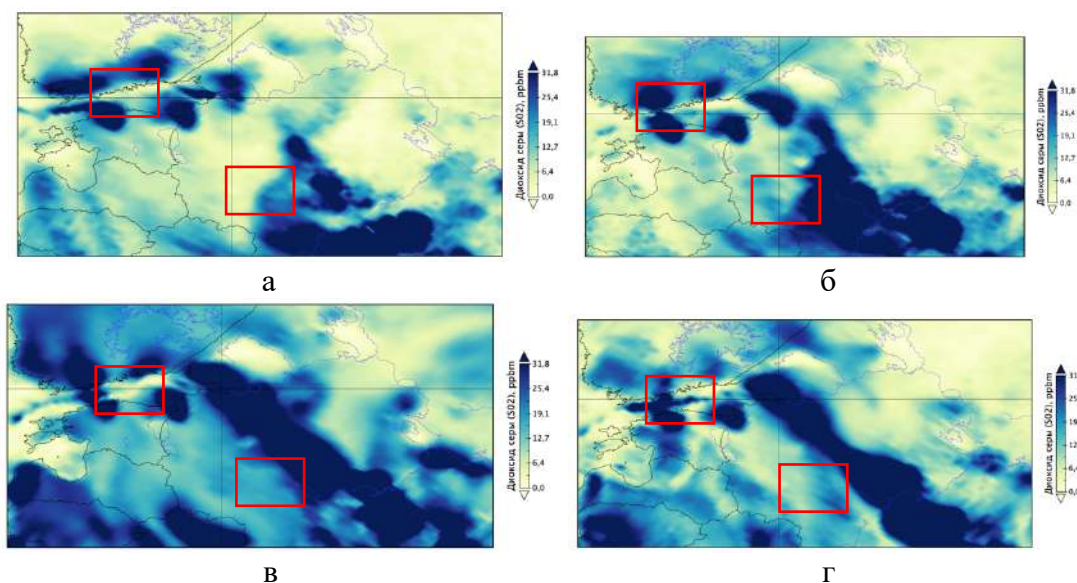


Рисунок 4.17 – Распространение диоксида серы 08.08.2010 года: (а) 00 UTC, (б) 06 UTC, (в) 12 UTC, (г) 18 UTC

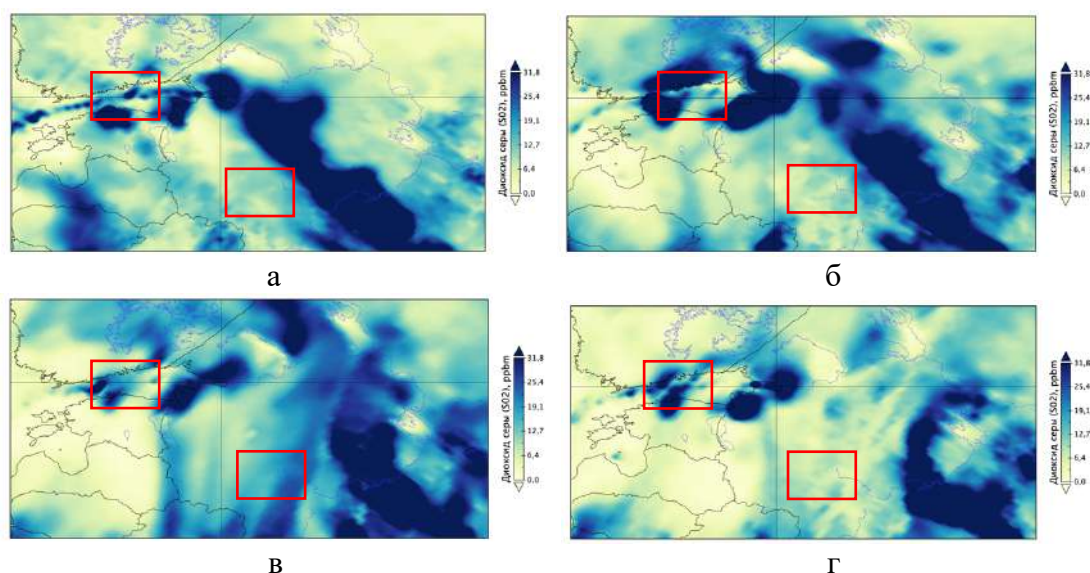


Рисунок 4.18 – Распространение диоксида серы 09.08.2010 года: (а) 00 UTC, (б) 06 UTC, (в) 12 UTC, (г) 18 UTC

На протяжении всего исследуемого срока наблюдается повышенное содержание SO_2 над исследуемыми территориями, также стоит отметить, что 8 и 9 числа в 12 часов UTC покрыта большая часть территории. Содержание диоксида серы в данный период составляет 31,8 ppb над Санкт-Петербургом и Москвой, переводя значения в нужную измеряемую величину, мы получим 0,085 мг/м³.

В целях ограничения содержания загрязняющих веществ в окружающей природной среде, была принята мера предельно допустимой концентрации (ПДК) (см. рисунок 4.19). ПДК определяется как такая концентрация, при которой воздействие на человека, как непосредственно, так и опосредованно, не вызывает заболеваний или изменений в здоровье как современными, так и ближайшими в будущем методами исследования с настоящего и последующих поколений. В практике нормирования и оценки степени загрязнения воздушной среды используются различные виды ПДК: ПДК_{ра} (предельно допустимая концентрация вредного вещества в воздухе рабочей зоны), ПДК_{сс} (предельно допустимая среднесуточная концентрация вредного вещества в воздухе населенных мест) и ПДК_{мр} (предельно допустимая максимальная разовая концентрация вредного вещества в воздухе населенных мест). [56]

Вещество	Класс опасности	ПДКМР, мг/м ³	ПДКСС, мг/м ³
Оксид углерода (CO)	4	5	3
Аммиак (NH ₃)	4	0,2	0,04
Ксилол (C ₈ H ₁₀)	3	0,2	-
Оксид азота (NO)	3	0,4	0,06
Диоксид серы (SO ₂)	3	0,5	0,05
Толуол (C ₇ H ₈)	3	0,6	-
Сероводород (H ₂ S)	2	0,008	-
Хлор (Cl ₂)	2	0,1	0,03
Формальдегид (НСОН)	2	0,035	0,003
Диоксид азота (NO ₂)	2	0,085	0,04
Фенол (C ₆ H ₆ O)	2	0,01	0,003
Бензол (C ₆ H ₆)	2	0,3	0,1
Озон (O ₃)	1	0,16	0,03
Свинец (Pb)	1	0,001	0,0003

Рисунок 4.19 – ПДК некоторых вредных веществ в атмосферном воздухе, установленной в Российской Федерации [56]

Таким образом, количество содержания SO₂ в период с 7 по 9 августа 2010 г. превысило значения ПДК приблизительно в 2 раза.

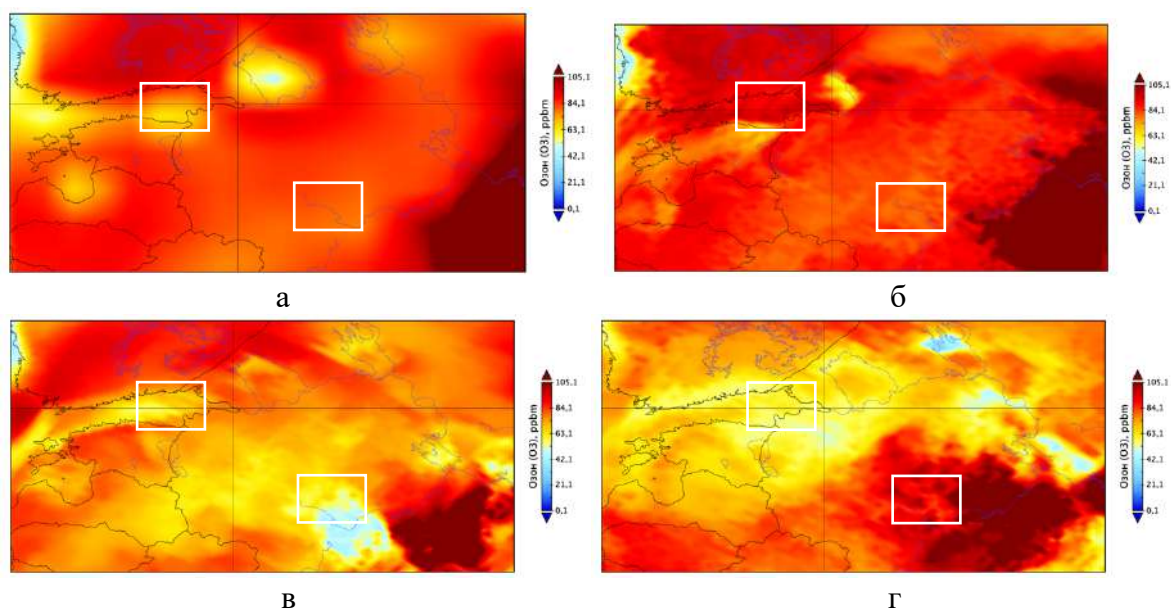


Рисунок 4.20 – Распространение озона 07.08.2010 года: (а) 00 UTC, (б) 06 UTC, (в) 12 UTC, (г) 18 UTC

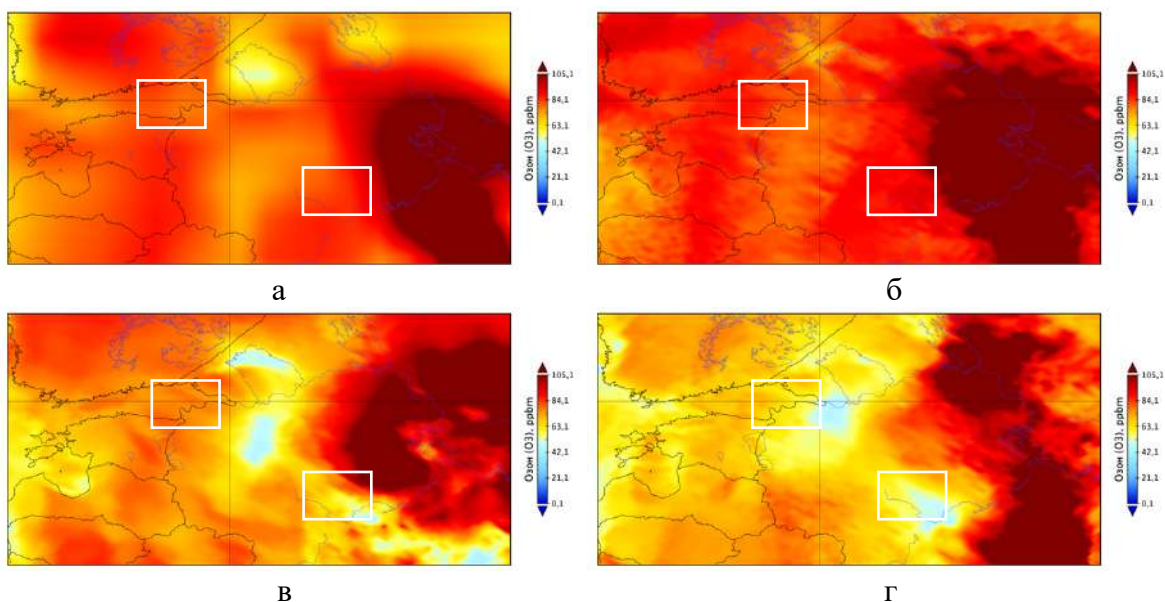


Рисунок 4.21 – Распространение озона 08.08.2010 года: (а) 00 UTC, (б) 06 UTC, (в) 12 UTC, (г) 18 UTC

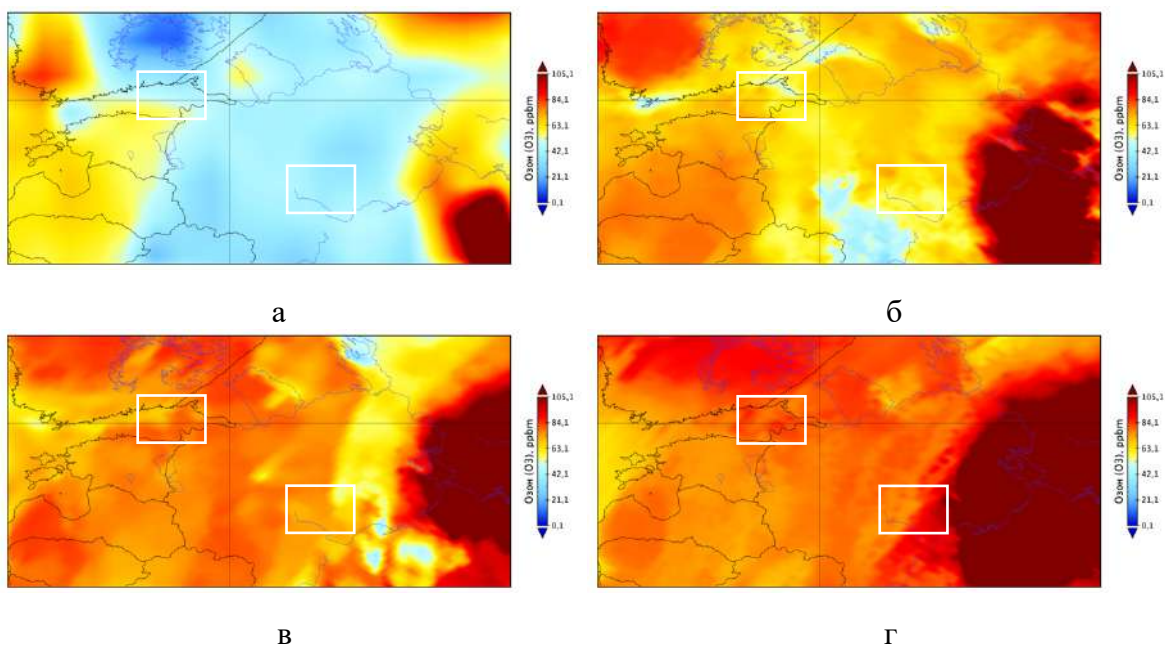


Рисунок 4.22 – Распространение озона 09.08.2010 года: (а) 00 UTC, (б) 06 UTC, (в) 12 UTC, (г) 18 UTC

Как известно, благоприятными условиями формирования озона являются высокая температура и наличие дымки, исходя из полученных синоптических данных, а также метеорологических параметров, наличие рекордных значений температуры и дымки над исследуемыми территориями, была сформирована фотохимическая реакция, в связи с чем образовалось большое скопление O_3 над Санкт-Петербургом и Москвой. Полученные в результате моделирования

значения превышают норму ПДК в несколько раз. В ночные часы влияние O_3 намного меньше, так как значения температуры воздуха были значительно ниже, чем в дневные часы. Так, 9 августа 2010 года в 00 UTC значения были практически в пределах ПДК.

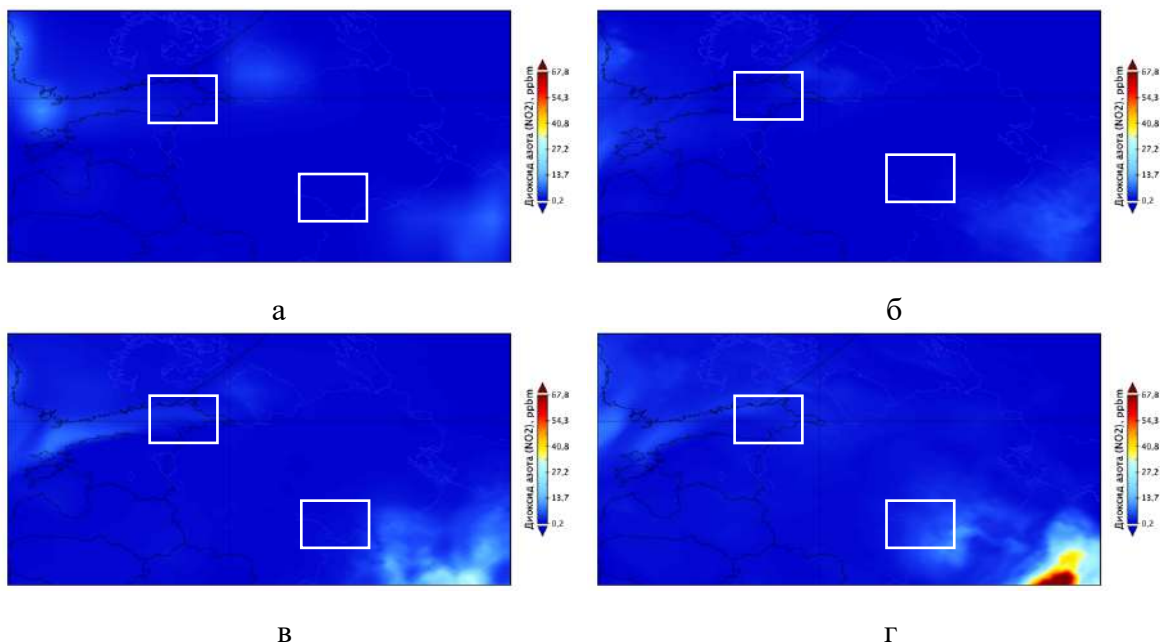


Рисунок 4.23 – Распространение диоксида азота 07.08.2010 года: (а) 00 UTC, (б) 06 UTC, (в) 12 UTC, (г) 18 UTC

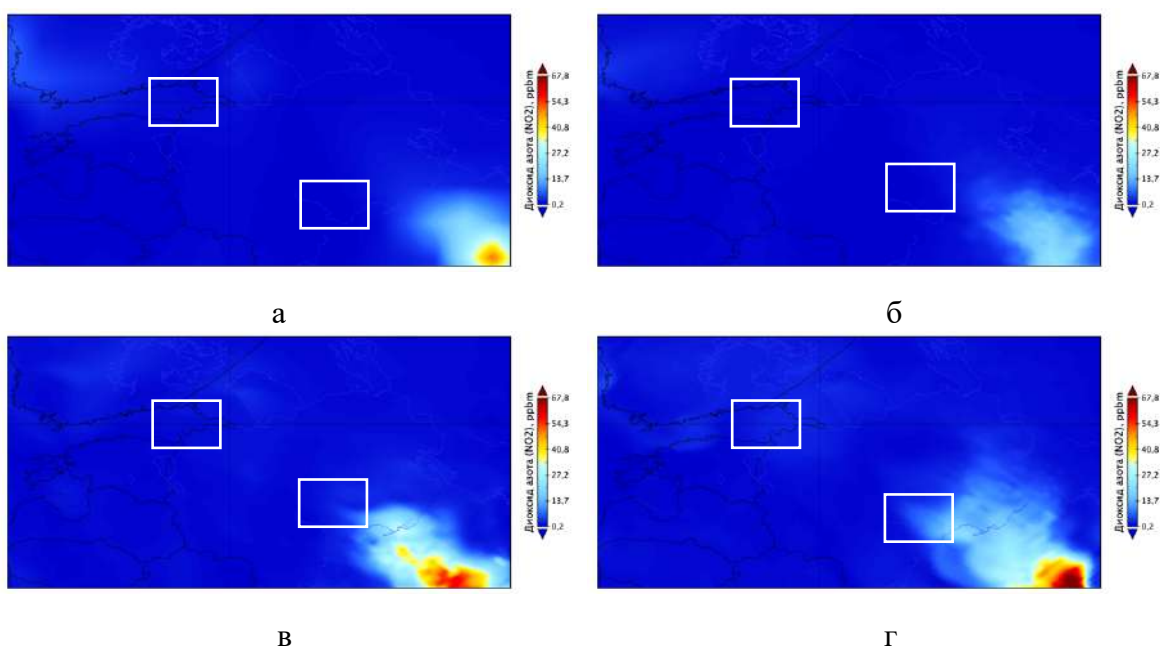


Рисунок 4.24 – Распространение диоксида азота 08.08.2010 года: (а) 00 UTC, (б) 06 UTC, (в) 12 UTC, (г) 18 UTC

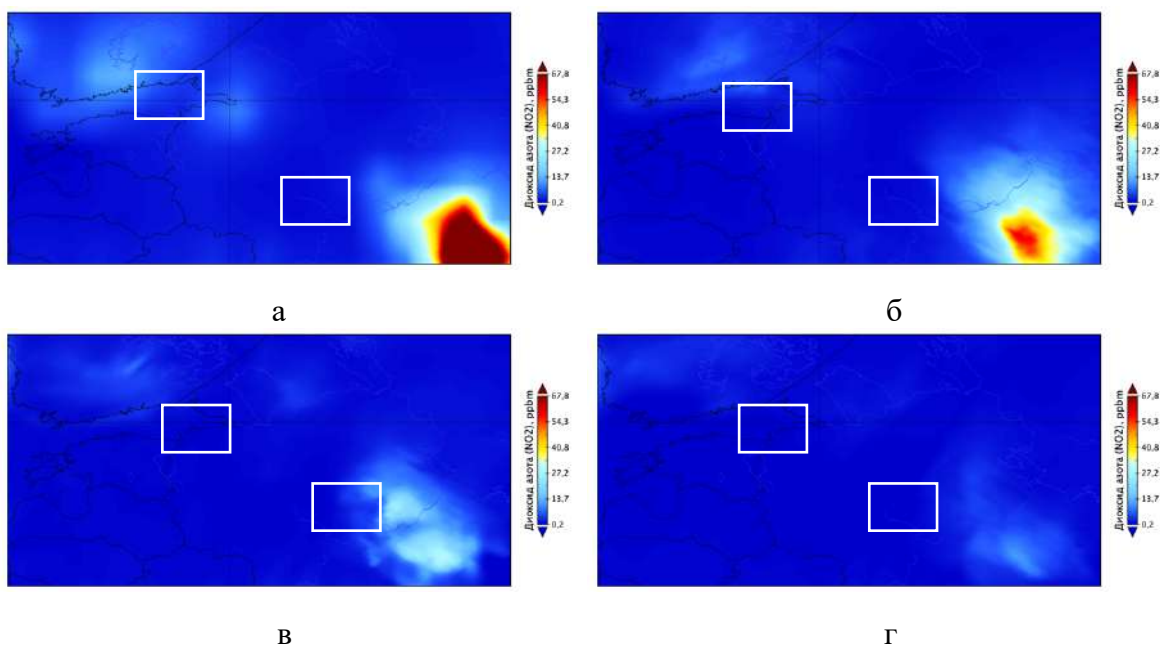
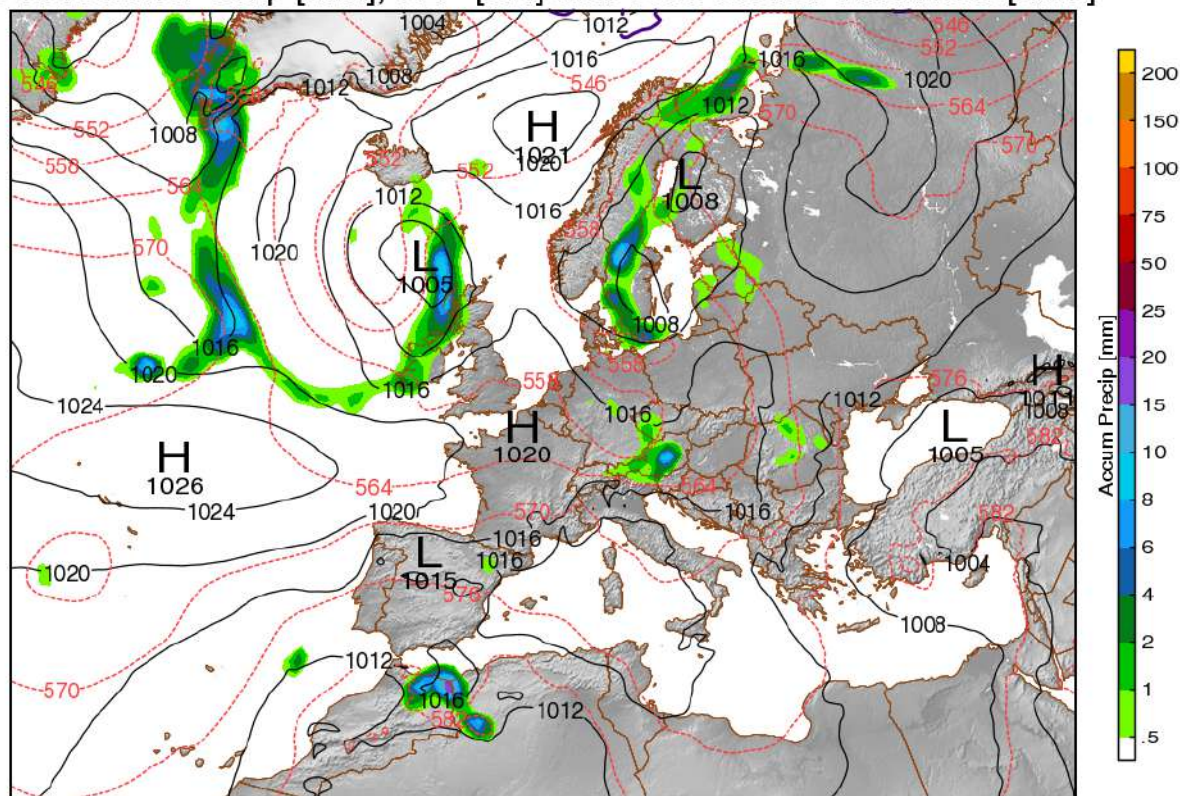


Рисунок 4.25 – Распространение диоксида азота 09.08.2010 года: (а) 00 UTC, (б) 06 UTC, (в) 12 UTC, (г) 18 UTC

В отличие от остальных химических элементов, NO_2 оказал наименьшее влияние на состояние атмосферы в исследуемый период. Над Санкт-Петербургом наблюдались значения, которые соответствуют значениям ПДК, над территорией Москвы содержание NO_2 в дневные часы значительно больше, нежели в ночные, связано это с понижением температуры. Однако, содержание данного вещества превышает нормы ПДК всего в 2 раза.

Под конец исследуемого срока было понижение давления, в связи с пришедшим над Северо-западным регионом циклоном. Также, 9 августа 2010 года наблюдалось выпадение осадков над Ленинградской областью (см. рисунок 4.26), в связи с чем наблюдалось понижение температуры в данном регионе.

3-hr Accum Precip [mm], SLP [mb] and 1000-500mb Thickness [dam]



Mon 08/09/2010 00Z

Рисунок 4.26 – Синоптическая карта исследуемого региона 09.08.2010 г. 00 UTC

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основной целью данной дипломной работы являлась комплексная оценка загрязнения атмосферы в городах Санкт-Петербург и Москва. Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи.

1. Проведен анализ существующих методов оценки качества атмосферного воздуха;
2. Выбраны наиболее оптимальные для исследования конкретных зон Санкт-Петербурга и Москвы;
3. Произведена обработка полученной информации и выделены основные источники выбросов вредных веществ в городах;
4. Проведена комплексная оценка загрязнения атмосферы Санкт-Петербурга и Москвы по результатам моделирования.

Прежде всего, для осуществления цели данной работы была адаптирована онлайн-интегрированная система моделирования метеорологии-химии-аэрозолей Enviro-HIRLAM. Для этого были получены все необходимые для анализа изображения. Во-вторых, были отобраны неблагоприятные погодные эпизоды в 2010 году с оценкой загрязнения воздуха. Были получены такие химические параметры, как: диоксид серы, озон, диоксид азота. В-третьих, проведена обработка полученной информации и были выделены основные источники выбросов вредных веществ в городах. Наконец, в данной дипломной работе были проведены визуализация (с помощью программы Panoply), анализ и обобщение результатов моделирования.

В данной работе получены следующие результаты: На основе результатов модели Enviro-HIRLAM был проведен анализ ветрового режима на уровне земли. Анализ SO_2 , O_3 , NO_2 , содержащихся в атмосферном воздухе над исследуемыми регионами в период 7-9 августа 2010 года. Была отмечена температурная инверсия, что поспособствовало накоплению SO_2 , O_3 , NO_2 в атмосфере, а также

над территорией Москвы преобладал штиль, а над территорией Санкт-Петербурга ветер был слабым.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Санкт-Петербург - климат [Электронный ресурс]: информационный портал. / Visit-Petersburg-туристический реестр Санкт-Петербурга. – URL: <https://visit-petersburg.ru/en/city/climate> (дата обращения: 03.12.2022).
2. "Качество воздуха в Санкт-Петербурге по-прежнему вызывает беспокойство, несмотря на небольшое улучшение в 2019 году", – РСЕ/РС, Дата публикации: 24 февраля 2020 года.
3. Климат в России [Электронный ресурс] / Lonelyplanet. – URL: <https://www.lonelyplanet.com/russia/climate> (дата обращения: 04.12.2022).
4. Air quality in Moscow [Электронный ресурс]: информационный портал. / AirVisual, –URL: <https://www.airvisual.com/world-air-quality-ranking/city/moscow> (дата обращения: 04.12.2022).
5. "Us moscow air pollution hits six year high raising health fears" [Электронный ресурс]: информационный портал. / Reuters. – URL: <https://www.reuters.com/article/us-russia-moscow-pollution/moscow-air-pollution-hits-six-year-high-raising-health-fears-idUSKCN1TF17E> (дата обращения: 17.10.2022).
6. St. Petersburg [Электронный ресурс] / Encyclopedia Britannica, inc., 2020, – URL: <https://britannica.com/place/Saint-Petersburg-Russia> (дата обращения: 13.11.2022).
7. География и климат Санкт-Петербурга [Электронный ресурс]: информационный портал. / Russia Beyond, 2017. – URL: https://www.rbth.com/travel/tips/2017/09/22/saint-petersburg-geography-climate_834673 (дата обращения: 17.11.2022).
8. Архив погоды в Санкт-Петербурге: [Электронный ресурс] / RP5 - Расписание Погоды. – Санкт-Петербург. – Обновляется в течение суток. – URL: https://rp5.ru/Архив_погоды_в_Санкт-Петербурге (дата обращения: 10.12.2022).
9. Характеристика климата Санкт-Петербурга: [Электронный ресурс] / Экологический портал Санкт-Петербурга: комитет по природопользованию,

охране окружающей среды и обеспечению экологической безопасности. – Санкт-Петербург. – Обновляется в течение суток. – URL: <https://www.infoeco.ru/index.php?id=1091> (дата обращения: 18.12.2022).

10. Основные характеристики климата и погоды г. Москвы [Электронный ресурс] / Norwegian forecast Yr.no. – URL: <https://pogoda-moscow.ru/osnovnye-kharakteristiki-klimata-i-pogody-moskvy> (дата обращения: 18.12.2022).

11. Архив погоды в Москве [Электронный ресурс] / RP5 -Расписание Погоды. – Санкт-Петербург. – Обновляется в течение суток. – URL: [https://rp5.ru/Архив_погоды_в_Москве_\(ВДНХ\)](https://rp5.ru/Архив_погоды_в_Москве_(ВДНХ)) (дата обращения: 18.11.2022).

12. Zhang, J. (2015). PM2.5 characteristics and its chemical composition in the atmospheric boundary layer. *Journal of Environmental Sciences*, 29, 151-157.

13. Cai, J., & Hourdin, F. (2015). Effects of atmospheric instability on atmospheric air quality in the atmospheric boundary layer. *Climate Dynamics*, 44(7-8), 2285-2302.

14. Carruthers D., Hun J., C. R. Grimmond, C. S. B. & Belcher S. E. (2013). Mixing layer depth and urban air quality. *Environmental Science and Technology*, 47(16), 8898-8903.

15. Han L., Zhou W., Liang S., Li H., Li C. & Ma Y. (2015). Impact of land use on atmospheric quality: A case study in Beijing. *Environmental pollution*, 208 (Part B), 562-569.

16. Кондратьева, О. Е. Экология / О. Е. Кондратьева. – Высшее образование. – Москва : Юрайт, 2018. – 63-66 с. – ISBN 978-5-534-00769-5.

17. Atkinson R. and Arey J. (2003). Atmospheric degradation of volatile organic compounds. *Chemical Reviews*, 103(12), 4605-4638.

18. Ward P. L. & Gregoire L. J. (2014). Volcanic air pollution: sources, impacts, and potential solutions. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 281, 57-70.

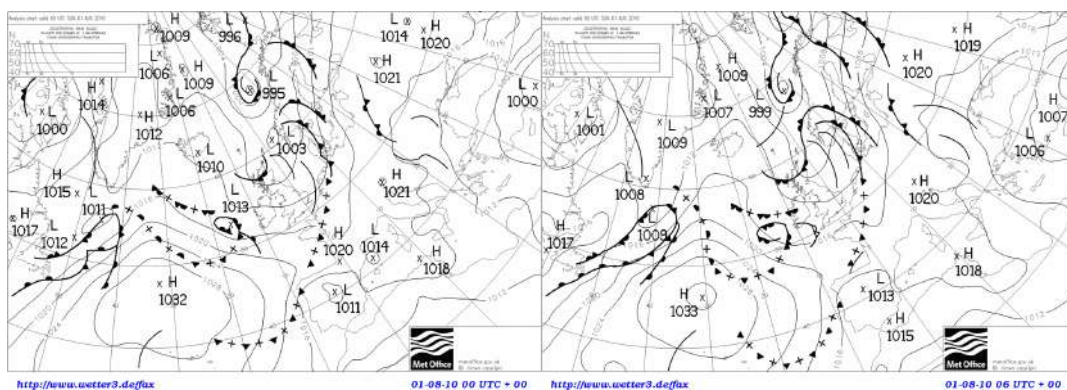
19. Williams A. M., Anderson G. B. & Bell M. L. (2019). Exposure to wildfire smoke and human health: Significant research gaps for a growing public health problem. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 68, 61-65.
20. Ghosh S., Majumdar S., Singh, S. & Mukherjee S. (2021). A study of air pollution due to vehicular traffic. *Aerosol and Air Quality Research*, 21(5), 200366.
21. Gurjar B. R., Butler T. M. et Lawrence M. G. (2010). Assessing emissions and air quality in metropolitan areas. *Atmospheric Environment*, 44(36), 4539-4556.
22. Kanakidou M., Sartelet K. N. & Pandis S. N. (2019). Megacities as air pollution hotspots in the Eastern Mediterranean. *Atmospheric Environment*, 203, 214-230.
23. Дышите глубже [Электронный ресурс] / Коммерсантъ - электронная газета. – URL: <https://www.kommersant.ru/doc/5117088>. – Дата публикации: 15.12.2021.
24. Cossio A. B., Murga M. L. & Sambeth J. E. (2021). Monitoring air quality at a landfill and industrial emissions site in Córdoba, Argentina: assessing airborne particulate matter-related cancer risk. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(21), 26625-26638.
25. Dimitriou K., Kassomenos P. A. & Karakitsios S. P. (2017). Contribution of agricultural and transport emissions to ambient air quality in a suburban area of Athens, Greece. *Environmental Monitoring and Assessment*, 189(6), 1-12.
26. Дышите глубже [Электронный ресурс] / Коммерсантъ - электронная газета. – URL: <https://www.kommersant.ru/doc/5117088>. – Дата публикации: 15.12.2021. (дата обращения: 02.10.2022).
27. Maybach M. (2016). Megacities: A source of air pollution. *Environmental Health Perspectives*, 124(10), A188-A193.
28. Pope III C. A. and Dockery D. W. (2006). The health effects of fine particulate air pollution: Lines that connect. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 56(6), 709-742.
29. Lu B., Jiang J., Wang X. & Hao J. (2013). Source distribution analysis and control policies for nitrogen oxides. *Atmospheric Environment*, 76, 253-262.

30. Huang R. J., Zhang Y., Bozzetti K., Ho C. F., Cao J. J., Han Y., . and Prevost A. S. (2014). High contribution of secondary aerosol to particulate pollution during haze. *Nature*, 514(7521), 218-222.
31. Летучие органические соединения (ЛОС) [Электронный ресурс] / EcoProverka : сайт. – URL: <https://ecoproverka.ru/letuchie-organicheskie-soedineniya-los> (дата обращения: 03.12.2022)
32. Khalek I. A., and Al-Hamadani A. H. (2016). Carbon monoxide pollution: Sources and consequences in the environment. *Journal of environmental chemistry and toxicology*, 1(1), 6-10.
33. Индекс качества воздуха (AQI) - руководство по качеству воздуха и вашему здоровью. [Электронный ресурс] / Управление по охране окружающей среды (EPA): руководство. – 2019. – URL: https://www.epa.gov/sites/production/files/2014-05/documents/zac_guide_0.pdf (дата обращения: 18.11.2022).
34. YGPE [Электронный ресурс] / сайт. – URL: <https://ygpe.tj/%EF%BF%BChto-takoe-indeks-kachestva-vozdruha-ili-na-anglijskom-aqi/> (дата обращения: 18.11.2022).
35. Индекс качества окружающей среды (EQI) [Электронный ресурс] / Управление по охране окружающей среды (EPA). – 2019. – URL: <https://www.epa.gov/planandbudget/environmental-quality-index-eqi-overview> (дата обращения: 18.12.2022).
36. Юсупова Г.Ф. Качество окружающей среды [Электронный ресурс] / Современные научные исследования и инновации. – 2017. № 1 – URL: <https://web.snauka.ru/issues/2017/01/74406> (дата обращения: 02.10.2022).
37. Han Z., Liu F., Yang T. and Zhang J. (2016). A review of transportation emission reduction strategies in megacities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 53, 462-473.
38. Загрязнение атмосферного воздуха: Глобальная оценка воздействия и бремени / Всемирная организация здравоохранения (ВОЗ) ; Inis Communcation. – Отчет о встрече. – Женева : atelier5b, 2016. – 121 с. – ISBN 978-92-4-151135-3.

39. Национальные стандарты качества атмосферного воздуха (NAAQS) [Электронный ресурс] / Управление по охране окружающей среды (EPA). – 2019 – URL: <https://www.epa.gov/criteria-air-pollutants/national-ambient-air-quality-standards-naaqs>
40. Мханна Ааед Исмаил Назир. / Метод расчета и климатологического анализа характеристик атмосферы, определяющих перенос и рассеяние примеси. – РГГМУ. 2009 – 129 с.
41. Guo L., and Zhang X. (2010). A study on the effects of meteorological conditions on fine particulate matter (PM_{2.5}). *Atmospheric Environment*, 44(19), 2345-2352. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2010.03.050>.
42. Saha S., Lal S. & Kundu D. (2019). Effects of meteorological parameters on air quality variability in tropical urban environments. *Atmospheric Pollution Research*, 10(4), 1189-1200. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.apr.2019.01.018>.
43. Terada Y. & Ohara T. (2004). Effects of meteorological conditions on PM_{2.5} concentrations in urban areas. *Journal of the Japan Meteorological Society*, 82(1), 183-196. – URL: <https://doi.org/10.2151/jmsj.82.183>
44. Загрязнение атмосферного воздуха (воздуха вне помещений) [Электронный ресурс] / Всемирная организация здравоохранения (ВОЗ). – Дата публикации: 19.12.2022 – URL: [https://www.who.int/ru/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/ru/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health) (дата обращения: 03.01.2023)
45. Россию избрали в Исполком ВОЗ [Электронный ресурс] / interfax : сайт. – Дата публикации 19.05.2020. – URL: <https://www.interfax.ru/world/709307> (дата обращения: 03.06.2023)
46. Министерство природных ресурсов и экологии РФ. / Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2019 году», Москва, 2020.
47. Воздействие взвешенных частиц на здоровье 2013 [Электронный ресурс] / Всемирная организация здравоохранения (ВОЗ).: статья. – URL: https://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0007/189052/Health-effects-of-particulate-matter-final-Rus.pdf

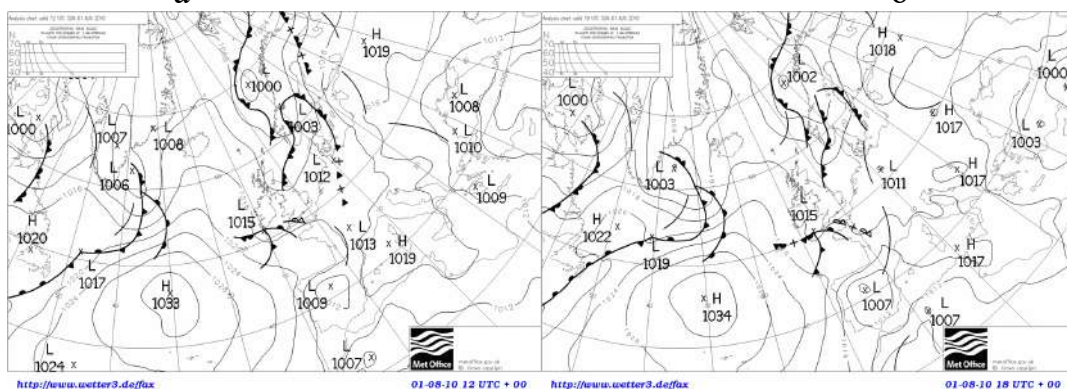
48. Росприроднадзор : сайт. – URL: <https://rpn.gov.ru/activity/services/> (дата обращения: 04.05.2023)
49. А. Бакланов и др: Онлайн система интегрированного метеоролого-химического моделирования Enviro-HIRLAM.
50. Feichter J., Kjellström E., Rodhe H., Dentener F., Lelieveldi J., and Roelofs G.-J.: Modeling the tropospheric sulfur cycle in a global climate model, *Atmosp. Environment*, 30, 1693-1707.
51. Horowitz L. W., Walters S., Mauzerall D. L., Emmons L. K., Rasch P. J., Granier C., Tie X., Lamarque J.-F., Schultz M. G., Tyndall G. S., Orlando J. J. and Brasseur G. P.: Global Modeling of Tropospheric Ozone and Associated Tracers: Description and Assessment of MOZART, version 2, *J. Geophys. Res.-Atmos.*, 108, 4784.
52. Vignati E., Wilson J. and Stier P. (2004), M7: An effective sized aerosol microphysics module for large-scale aerosol transport models, *J. Geophys. Res.*, 109, D22202, doi:10.1029/2003JD004485.
53. Baklanov A., Smith-Korsholm W., Nuterman R., Mahura A., Nielsen K.P., Sass B.H., Rasmussen A., Zaki A., Kaas E., Kurganski A., Sørensen B., and Gonzales-Aparicio I.: The Enviro-HIRLAM online integrated meteorological and chemical modeling system: strategy, methodology, development and applications (v7.2), *Geosci. Model Dev.*, 10, 2971-2999.
54. Kuenen J. J. P., Visschedijk A. J. H., Jozwicka M., and Denier van der Gon H. A. C.: The TNO-MACC_{II} emissions inventory; a multi-year (2003-2009) consistent European high resolution emissions inventory for air quality modeling, *Atmos. Chem. Physics*, 14, 10963-10976.
55. Университет Вайоминга [Электронный ресурс]: сайт. – URL: <https://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html> (дата обращения: 23.03.2023)
56. Предельно допустимая концентрация загрязняющих веществ [Электронный ресурс]: информаторий. – URL: <https://astrakhandobycha.gazprom.ru/d/textpage/6e/110/vozdukhinformatorij.pdf> (дата обращения: 15.04.2023)

ПРИЛОЖЕНИЕ А



а

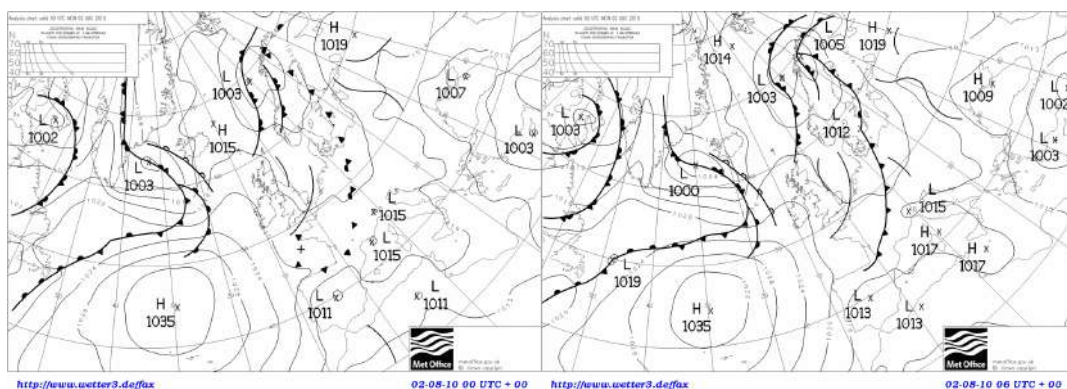
б



в

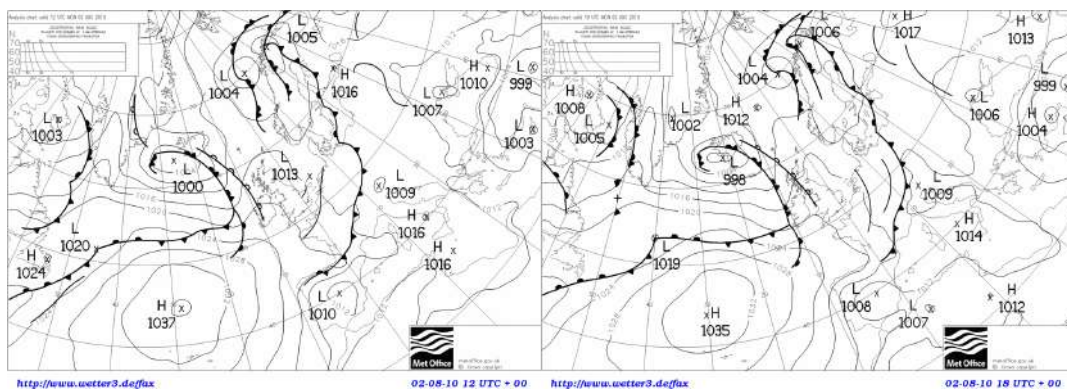
г

Рисунок 1.1 – Синоптическая карта 01.08.2010 года: (а) 00 UTC, (б) 06 UTC, (в) 12 UTC, (г) 18 UTC



а

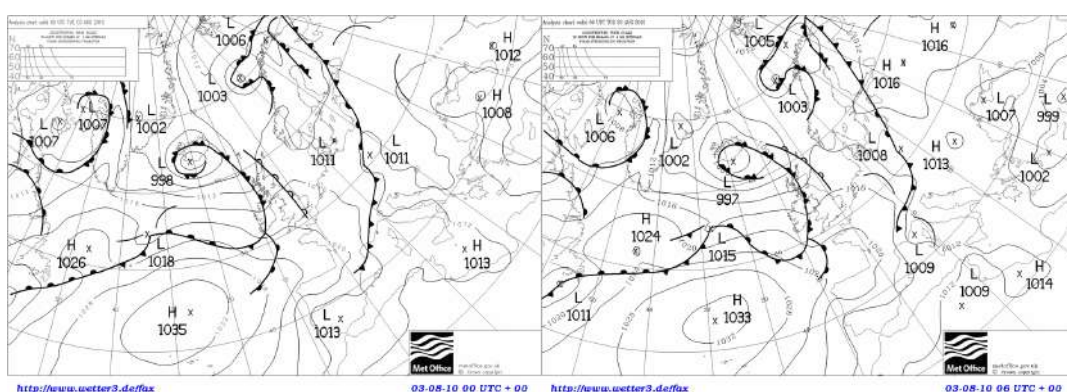
б



В

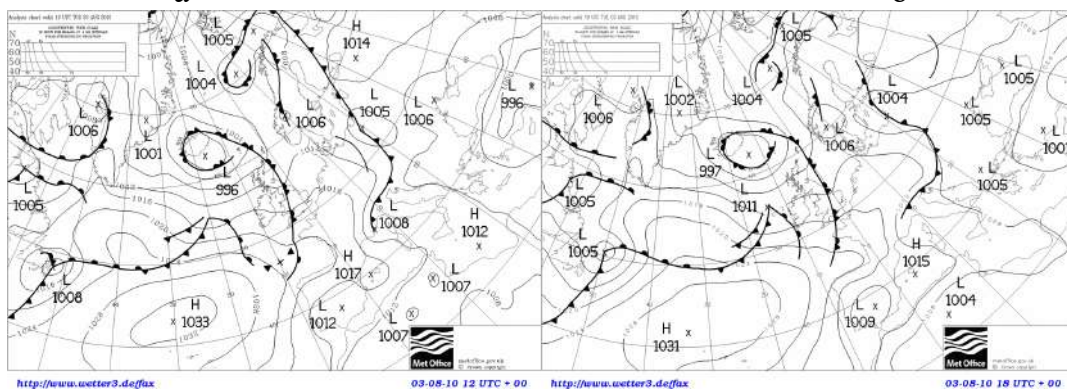
Г

Рисунок 1.2 – Синоптическая карта 02.08.2010 года: (а) 00 UTC, (б) 06 UTC, (в) 12 UTC, (г) 18 UTC



а

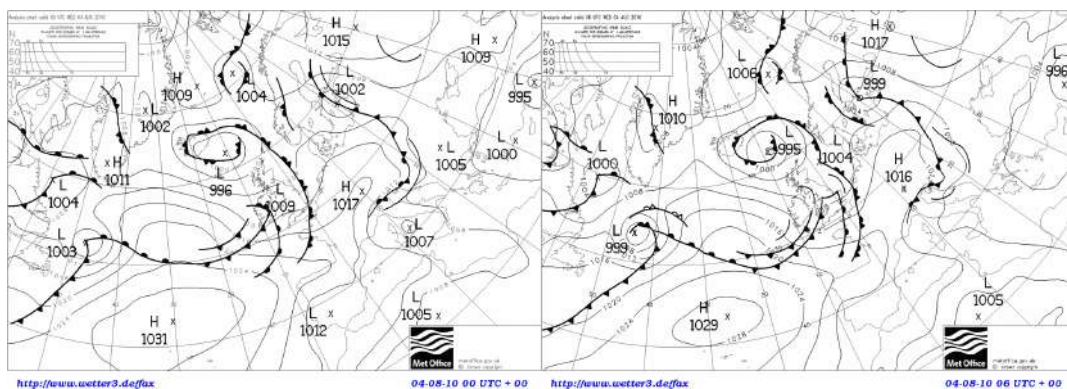
б



В

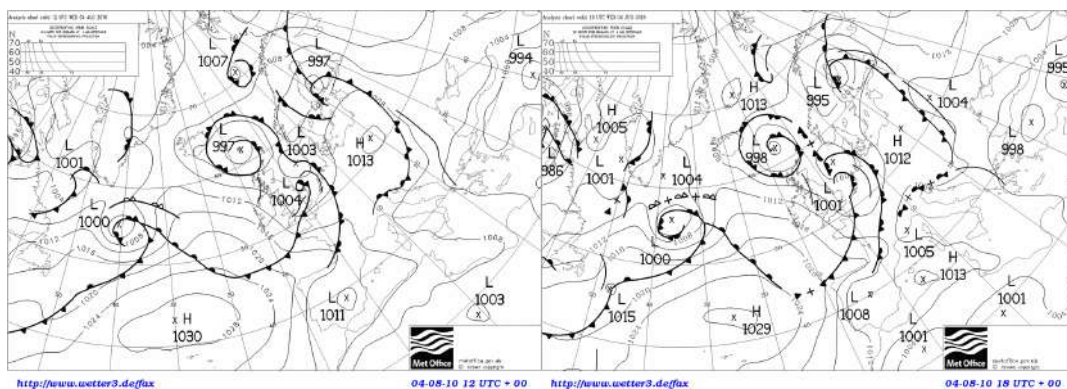
Г

Рисунок 1.3 – Синоптическая карта 03.08.2010 года: (а) 00 UTC, (б) 06 UTC, (в) 12 UTC, (г) 18 UTC



a

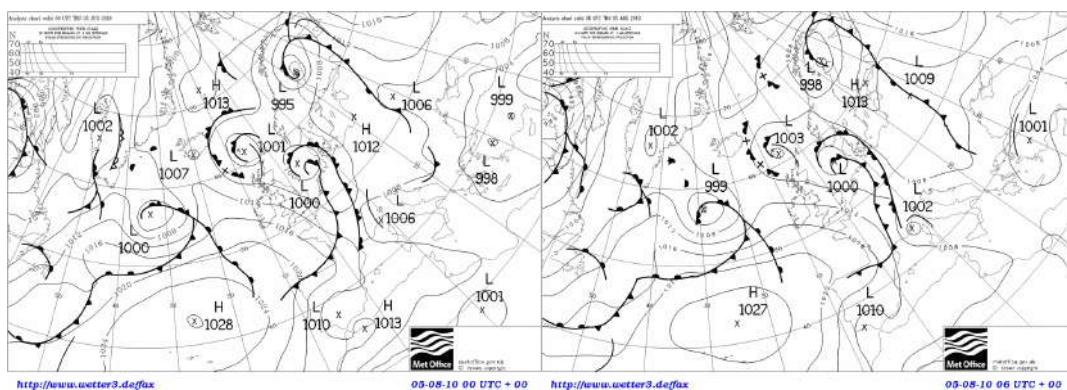
б



в

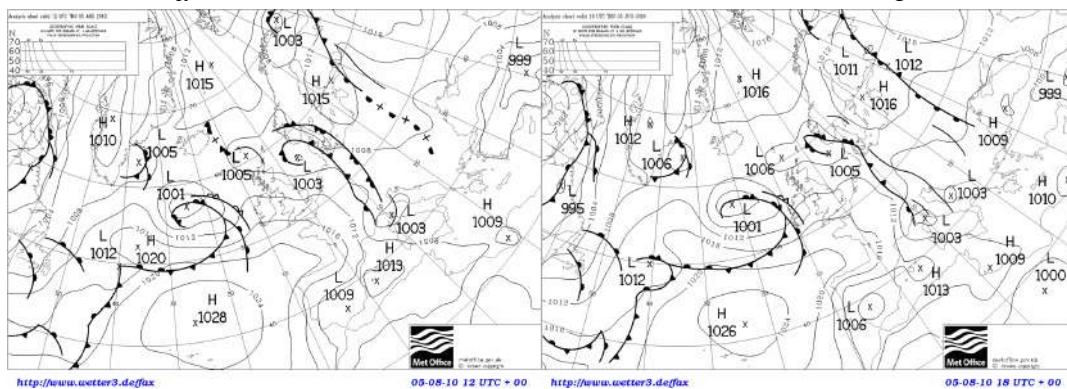
г

Рисунок 1.4 – Синоптическая карта 04.08.2010 года: (а) 00 UTC, (б) 06 UTC, (в) 12 UTC, (г) 18 UTC



a

б



в

г

Рисунок 1.5 – Синоптическая карта 05.08.2010 года: (а) 00 UTC, (б) 06 UTC, (в) 12 UTC, (г) 18 UTC

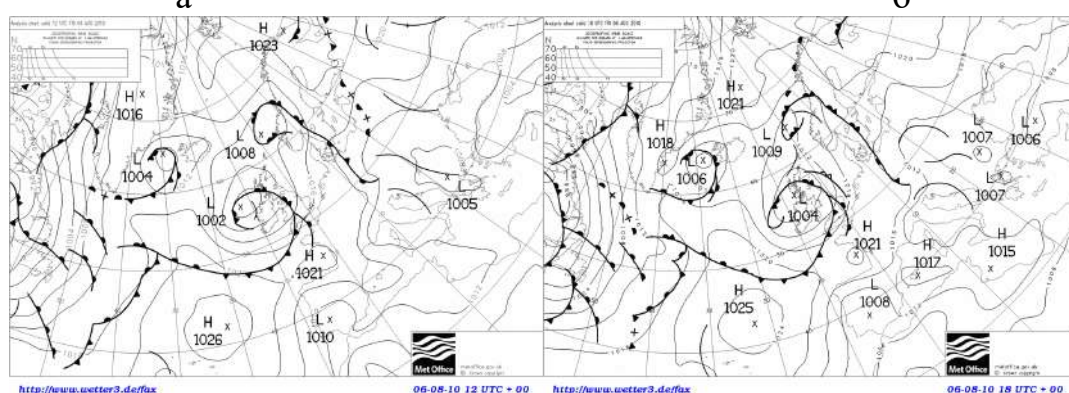
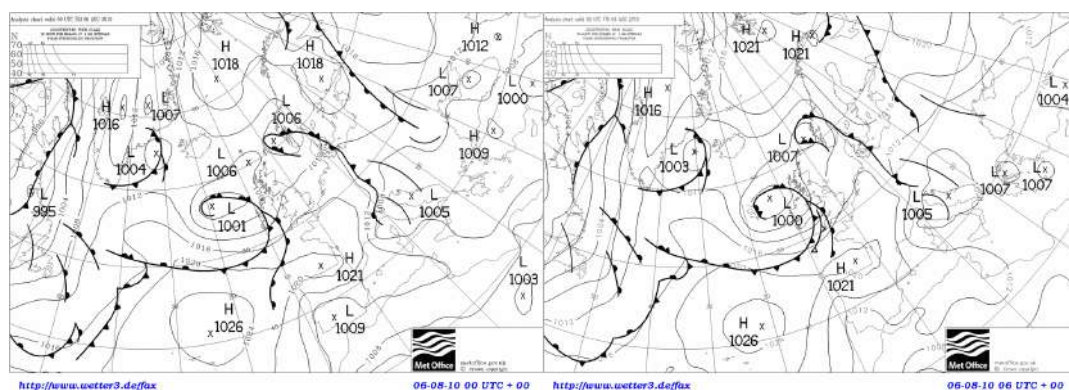
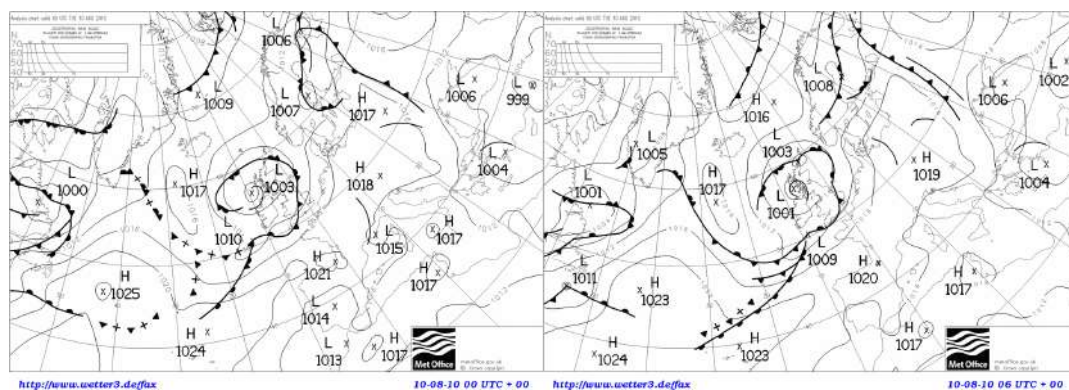
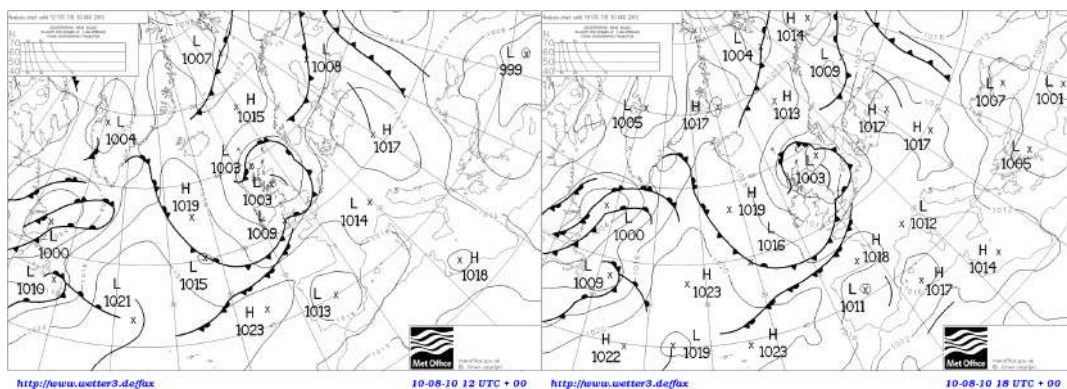


Рисунок 1.6 – Синоптическая карта 06.08.2010 года: (а) 00 UTC, (б) 06 UTC, (в) 12 UTC, (г) 18 UTC





В

Г

Рисунок 1.7 – Синоптическая карта 10.08.2010 года: (а) 00 UTC, (б) 06 UTC, (в) 12 UTC, (г) 18 UTC

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

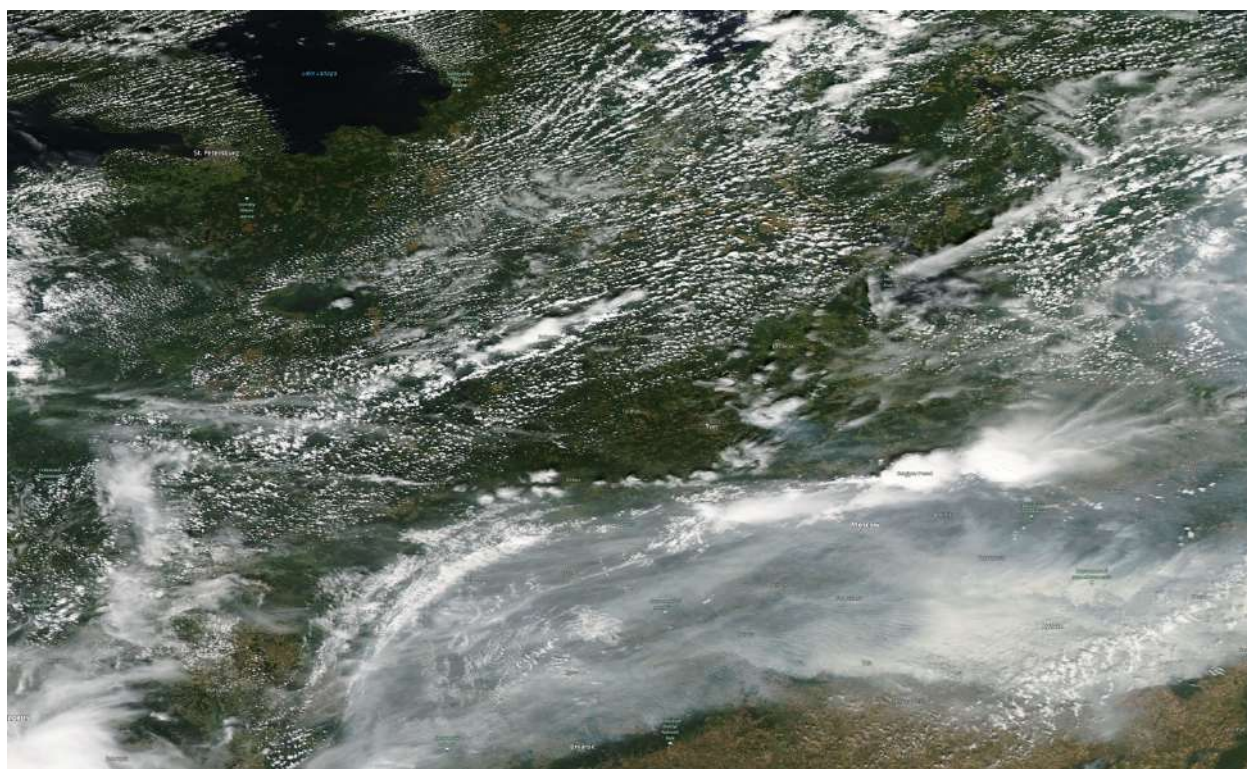


Рисунок 2.1 – Спутниковое изображение 01.08.2010 12 UTC

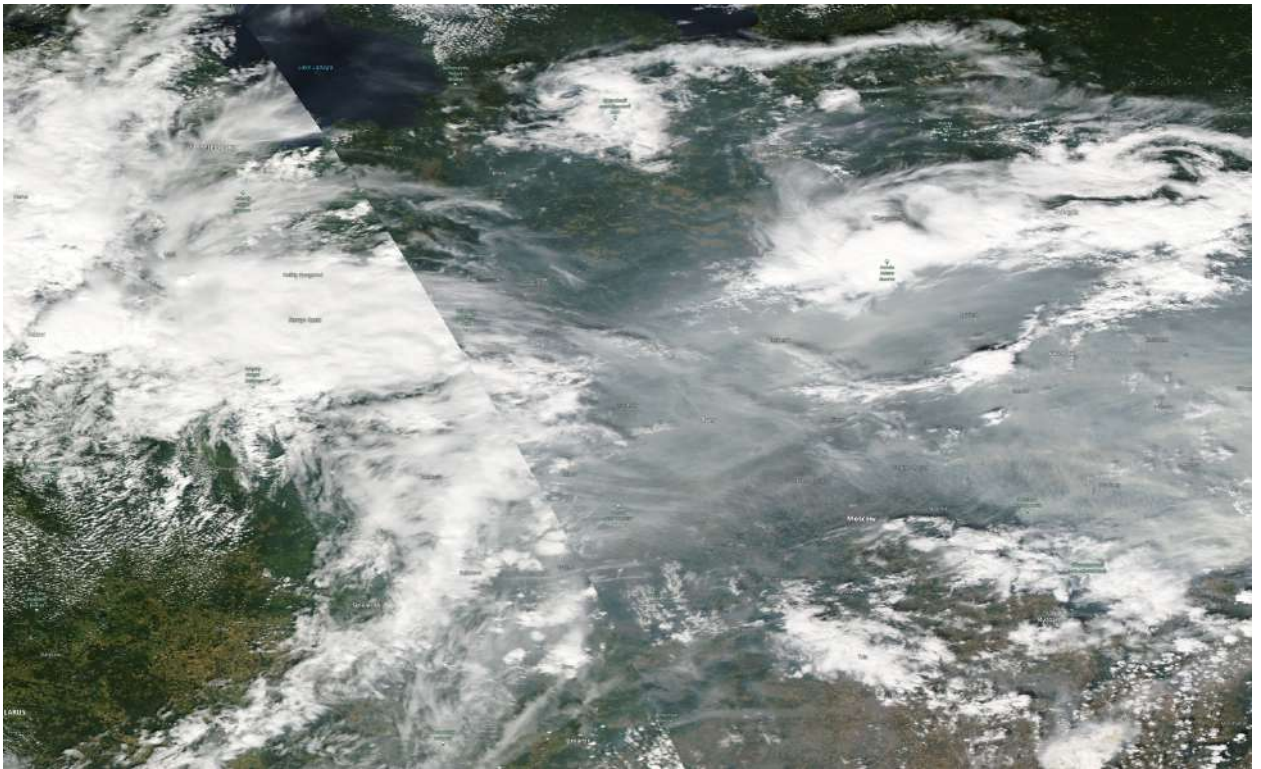


Рисунок 2.2 – Спутниковое изображение 02.08.2010 12 UTC

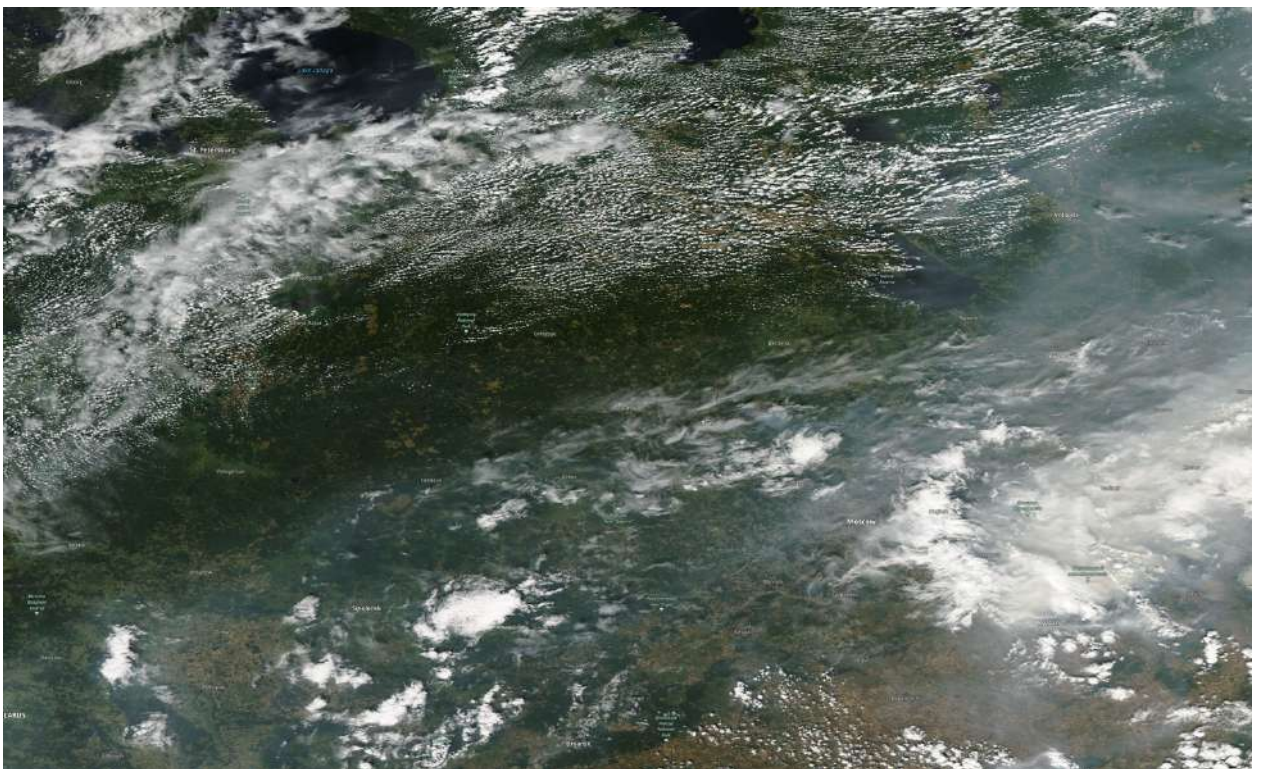


Рисунок 2.3 – Спутниковое изображение 03.08.2010 12 UTC



Рисунок 2.4 – Спутниковое изображение 04.08.2010 12 UTC



Рисунок 2.5 – Спутниковое изображение 05.08.2010 12 UTC



Рисунок 2.6 – Спутниковое изображение 06.08.2010 12 UTC



Рисунок 2.7 – Спутниковое изображение 10.08.2010 12 UTC

ПРИЛОЖЕНИЕ В

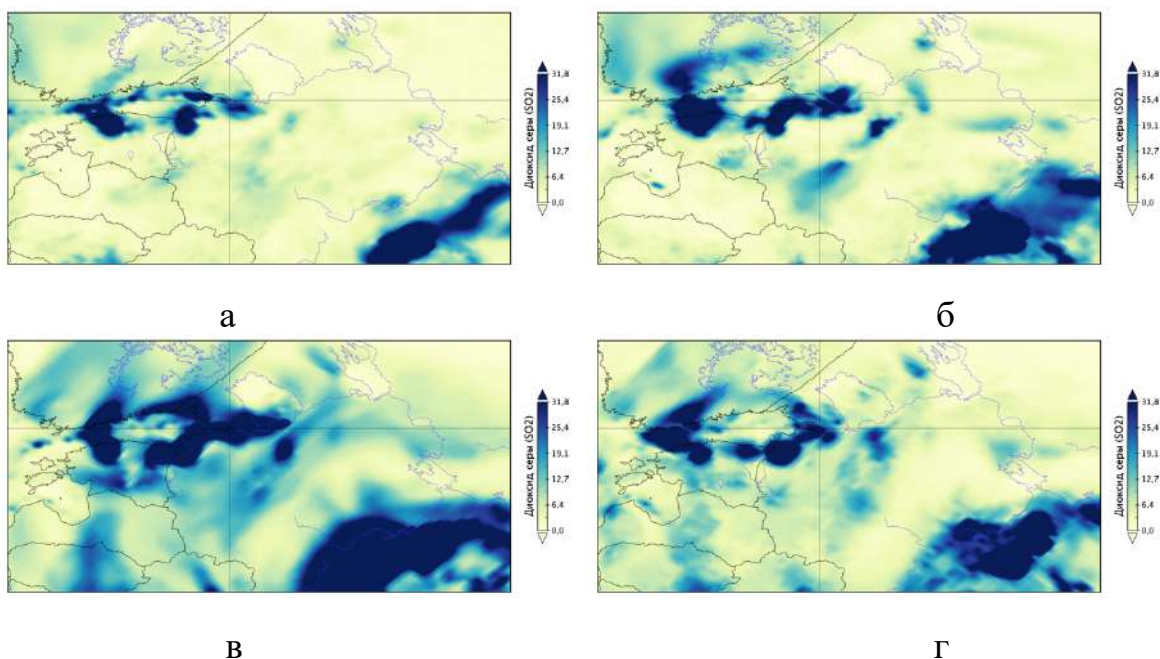


Рисунок 3.1 – Распространение диоксида серы 02.08.2010 года: (а) 00 UTC, (б) 06 UTC, (в) 12 UTC, (г) 18 UTC

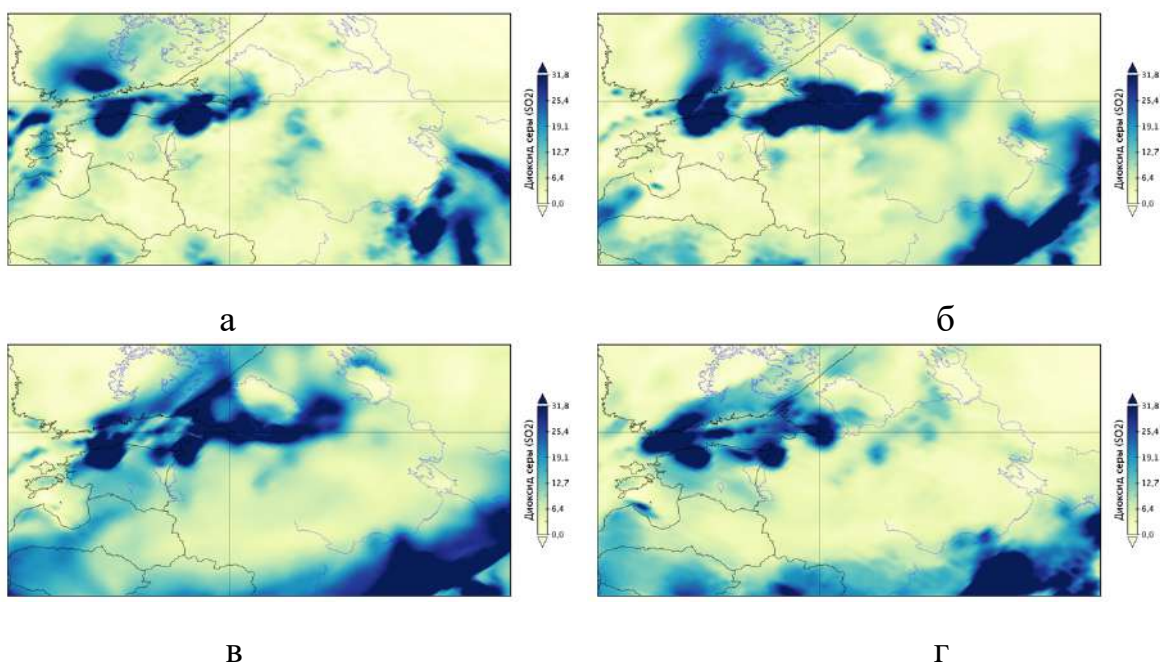


Рисунок 3.2 – Распространение диоксида серы 03.08.2010 года: (а) 00 UTC, (б) 06 UTC, (в) 12 UTC, (г) 18 UTC

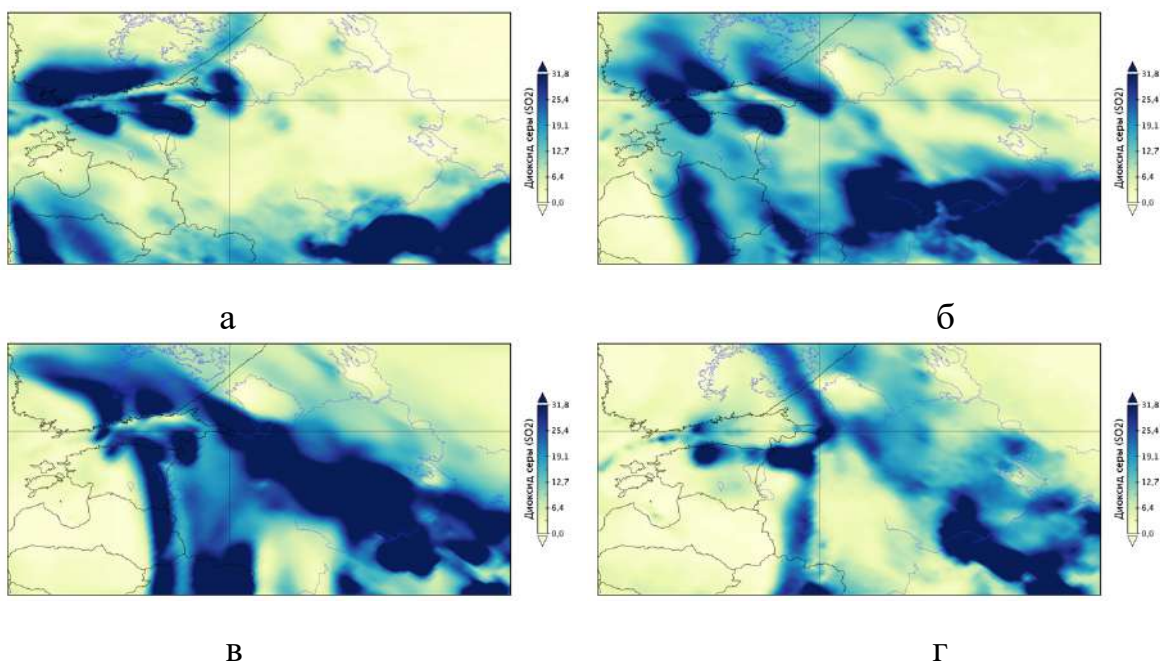


Рисунок 3.3 – Распространение диоксида серы 04.08.2010 года: (а) 00 UTC, (б) 06 UTC, (в) 12 UTC, (г) 18 UTC

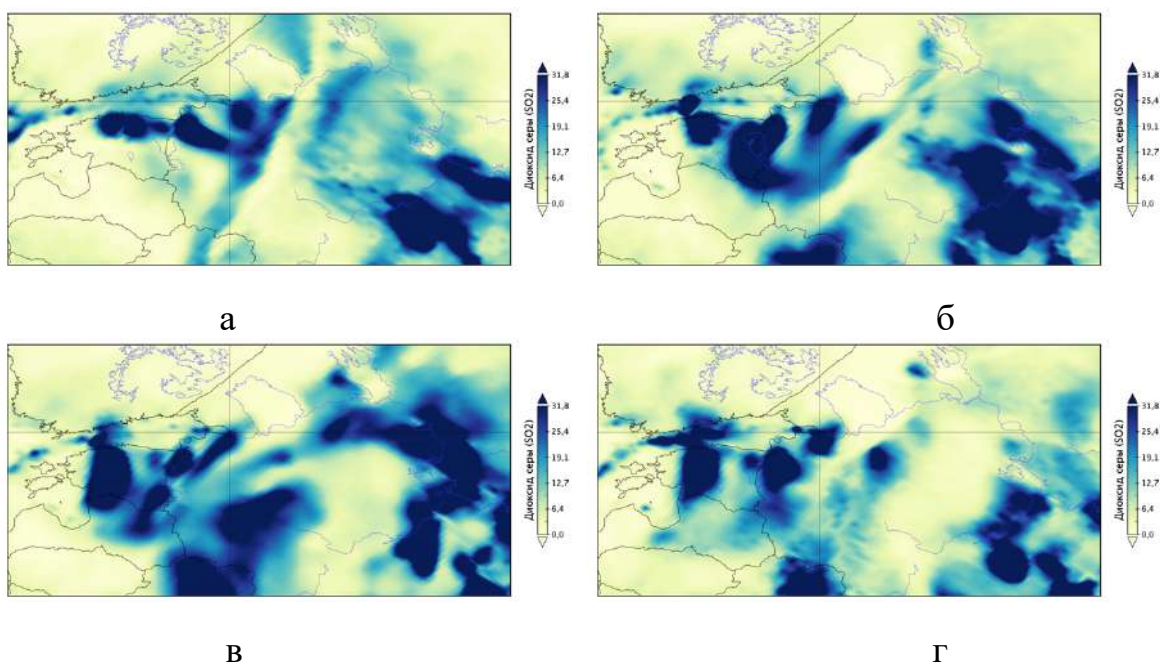
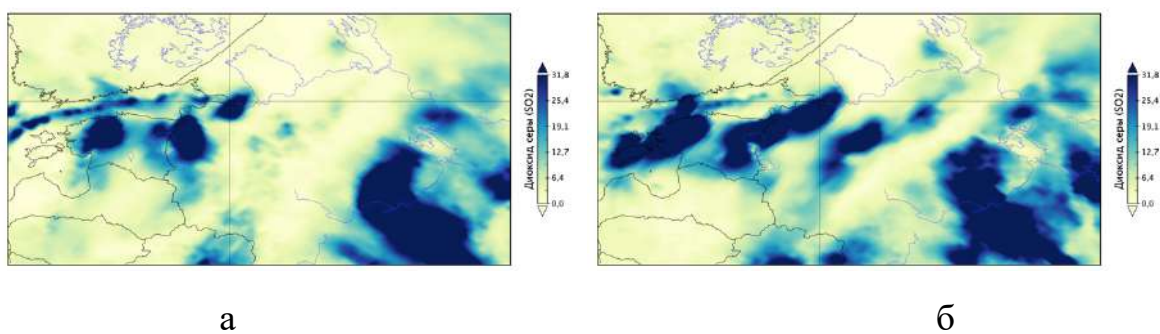
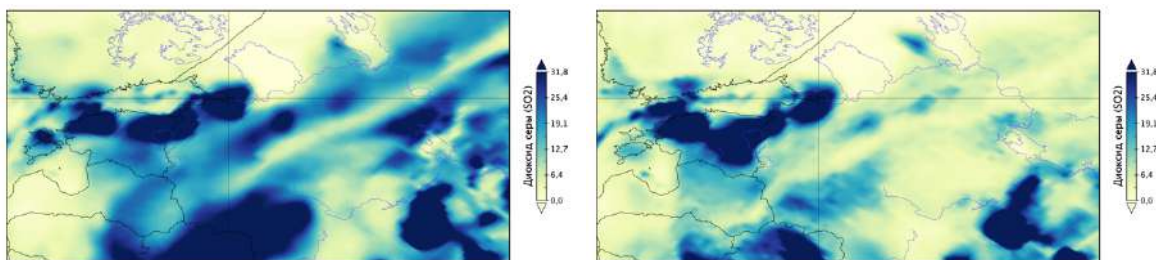


Рисунок 3.4 – Распространение диоксида серы 05.08.2010 года: (а) 00 UTC, (б) 06 UTC, (в) 12 UTC, (г) 18 UTC

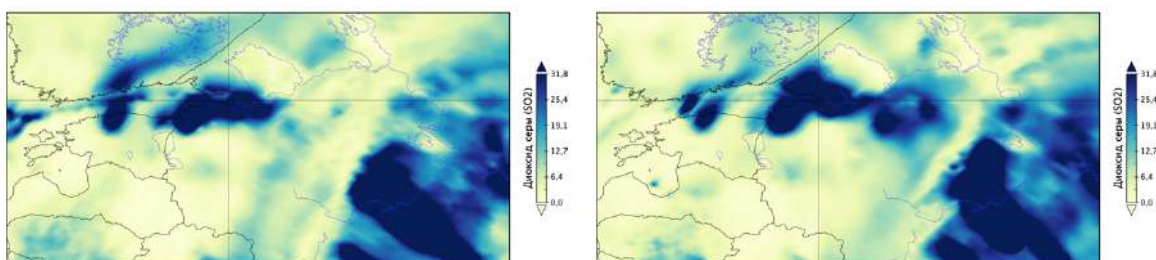




В

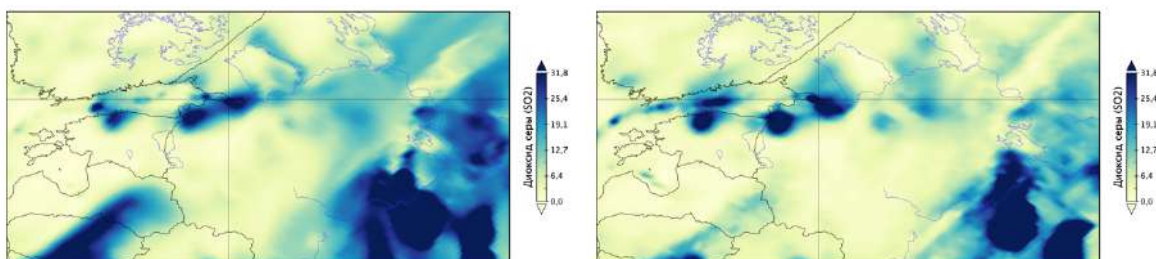
Г

Рисунок 3.5 – Распространение диоксида серы 06.08.2010 года: (а) 00 UTC, (б) 06 UTC, (в) 12 UTC, (г) 18 UTC



а

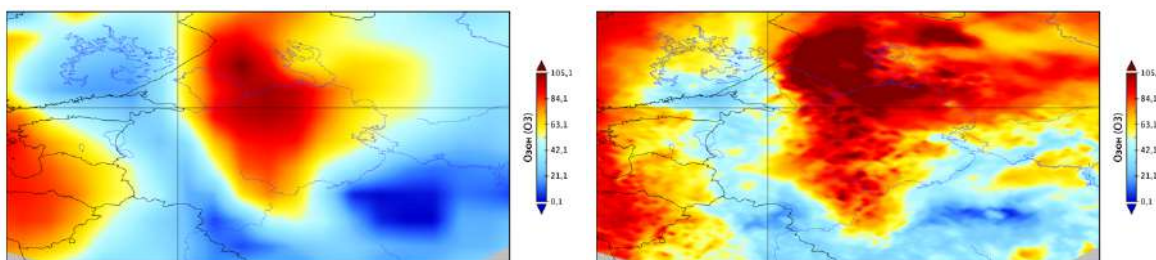
б



В

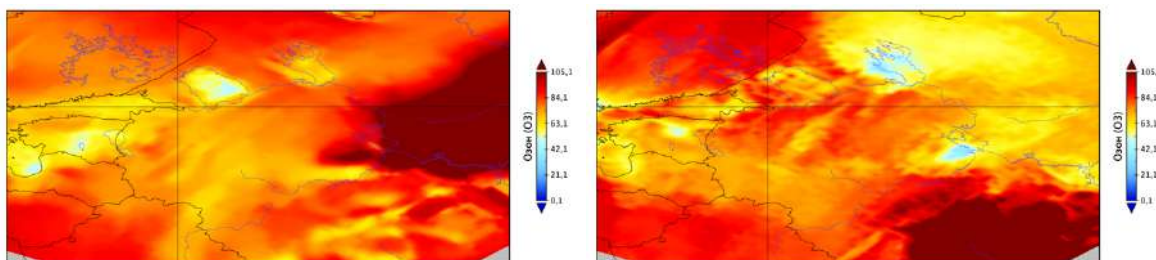
Г

Рисунок 3.6 – Распространение диоксида серы 10.08.2010 года: (а) 00 UTC, (б) 06 UTC, (в) 12 UTC, (г) 18 UTC



а

б



В

Г

Рисунок 3.7 – Распространение озона 02.08.2010 года: (а) 00 UTC, (б) 06 UTC, (в) 12 UTC, (г) 18 UTC

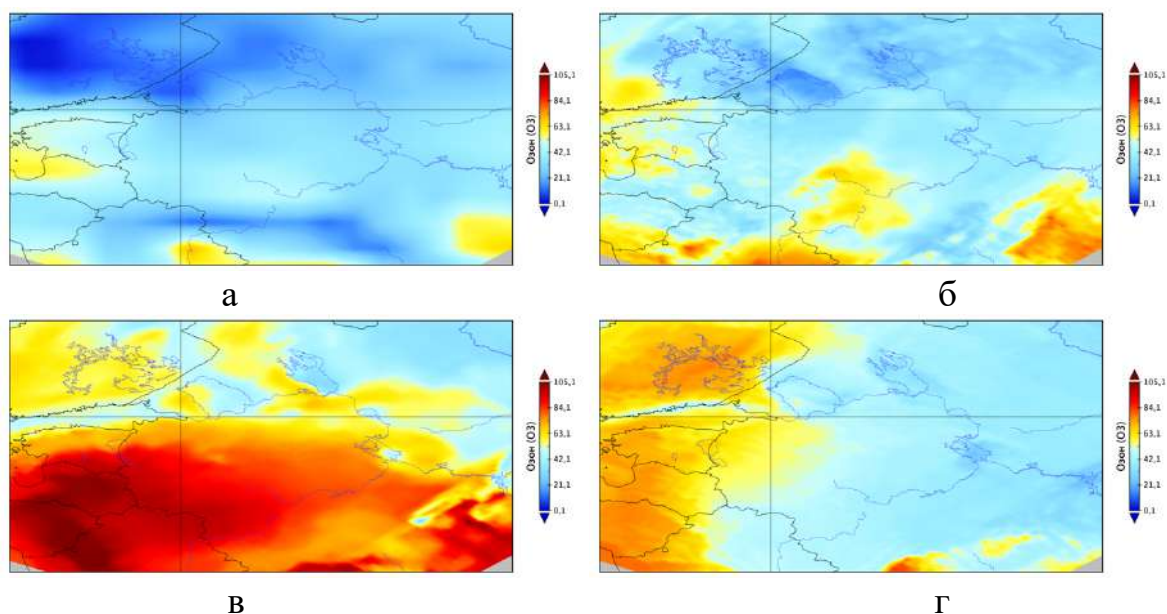


Рисунок 3.8 – Распространение озона 03.08.2010 года: (а) 00 UTC, (б) 06 UTC, (в) 12 UTC, (г) 18 UTC

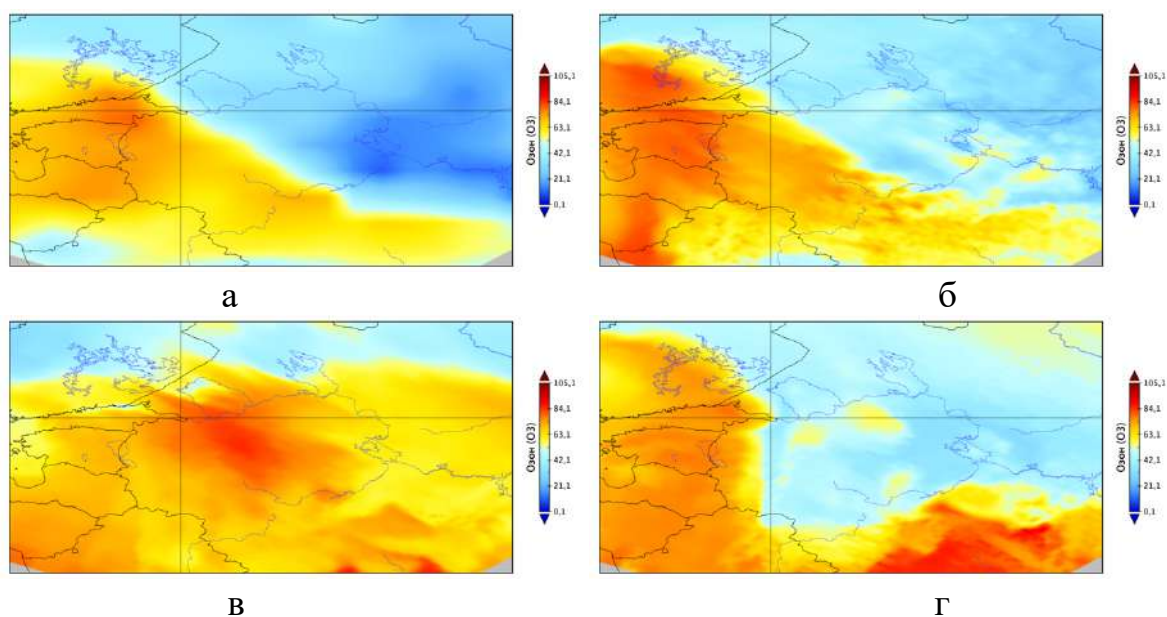
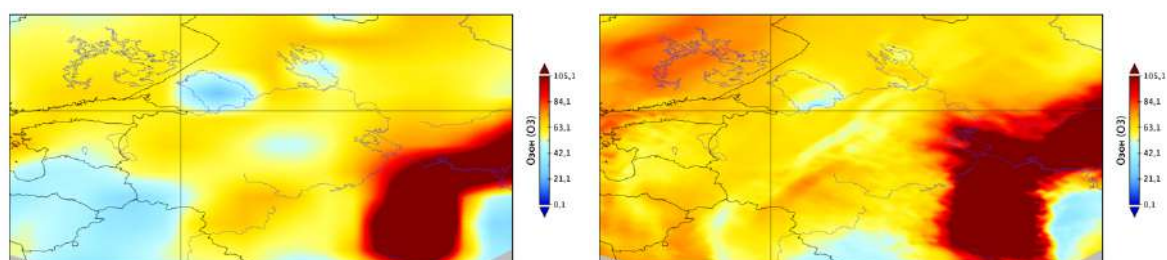


Рисунок 3.9 – Распространение озона 04.08.2010 года: (а) 00 UTC, (б) 06 UTC, (в) 12 UTC, (г) 18 UTC



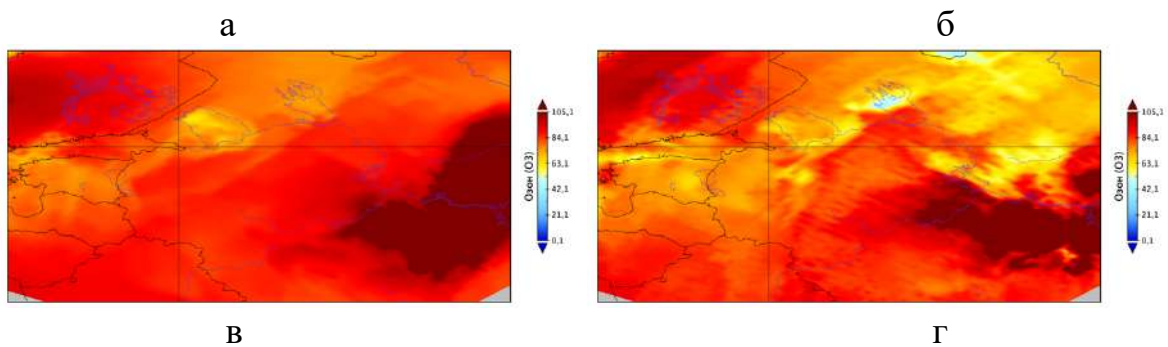


Рисунок 3.10 – Распространение озона 05.08.2010 года: (а) 00 UTC, (б) 06 UTC, (в) 12 UTC, (г) 18 UTC

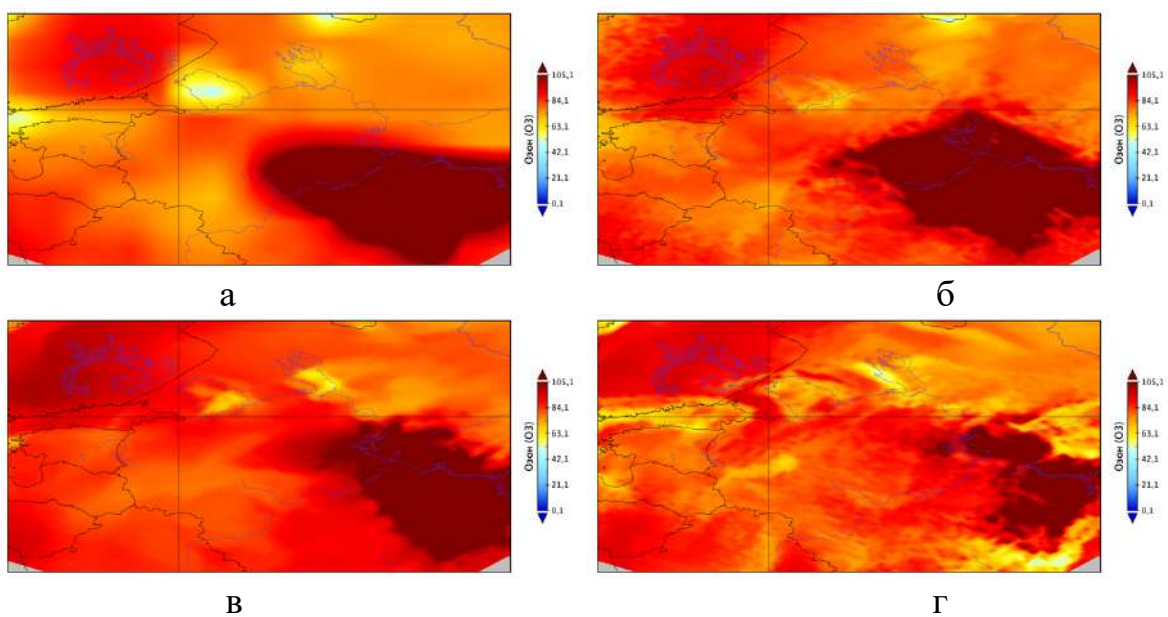


Рисунок 3.11 – Распространение озона 06.08.2010 года: (а) 00 UTC, (б) 06 UTC, (в) 12 UTC, (г) 18 UTC

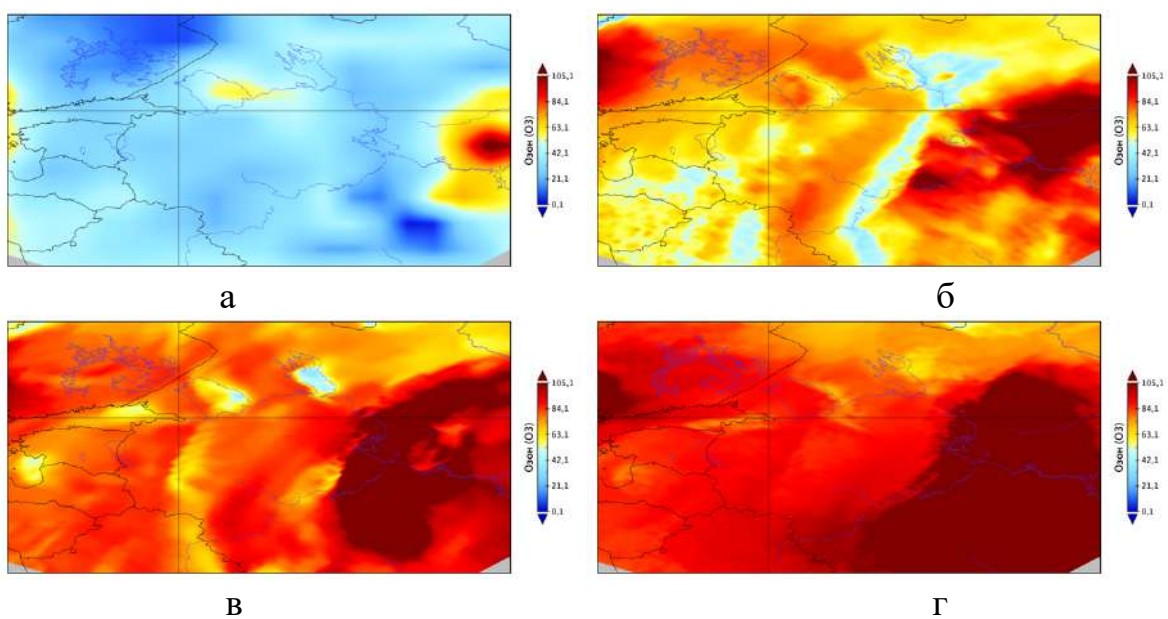


Рисунок 3.12 – Распространение озона 10.08.2010 года: (а) 00 UTC, (б) 06 UTC, (в) 12 UTC, (г) 18 UTC

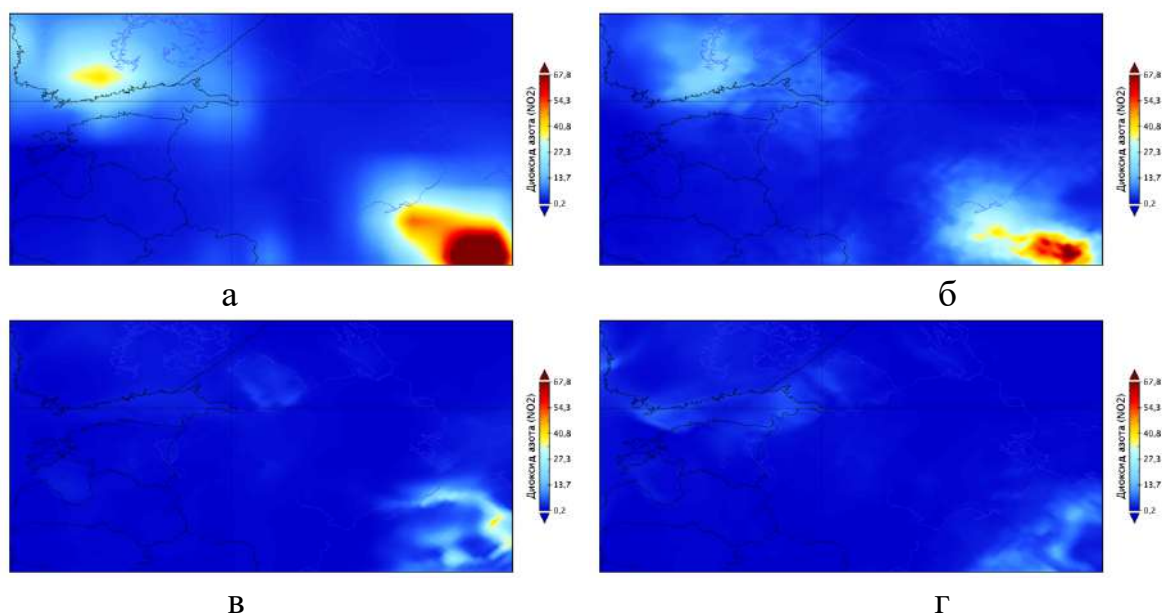


Рисунок 3.13 – Распространение диоксида азота 02.08.2010 года: (а) 00 UTC, (б) 06 UTC, (в) 12 UTC, (г) 18 UTC

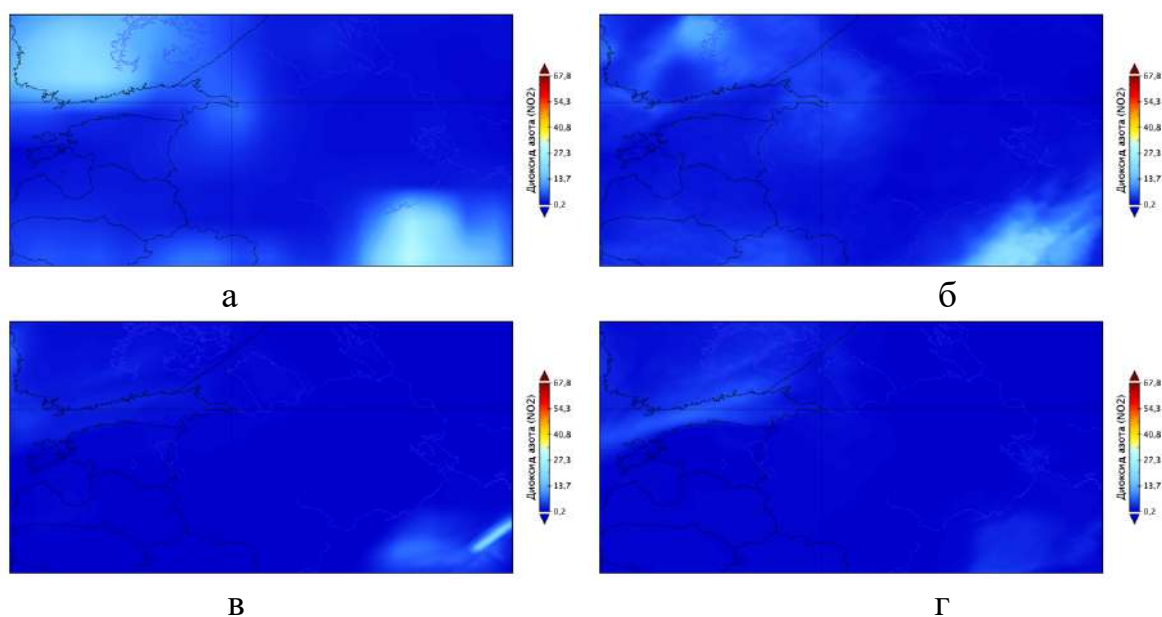
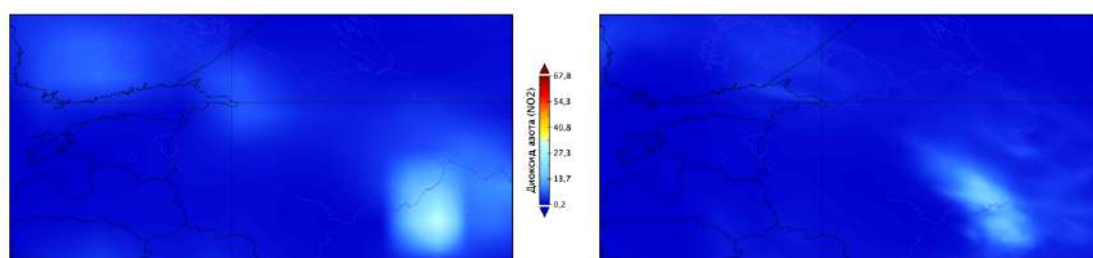


Рисунок 3.14 – Распространение диоксида азота 03.08.2010 года: (а) 00 UTC, (б) 06 UTC, (в) 12 UTC, (г) 18 UTC



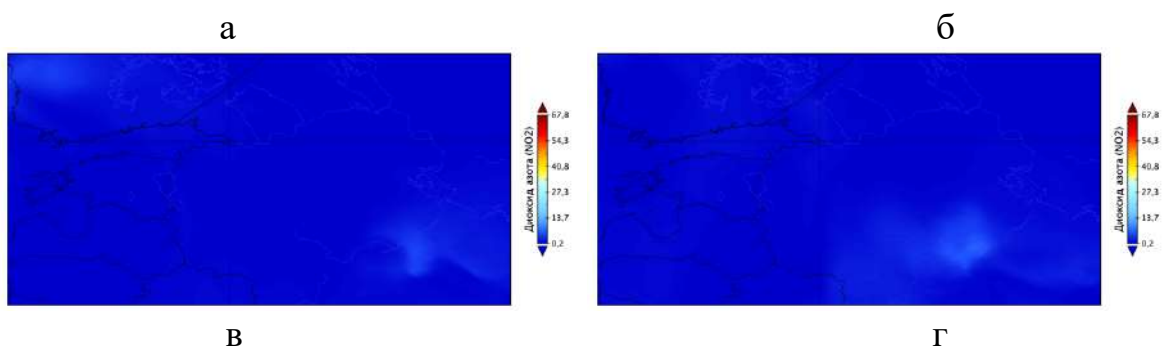


Рисунок 3.15 – Распространение диоксида азота 04.08.2010 года: (а) 00 UTC, (б) 06 UTC, (в) 12 UTC, (г) 18 UTC

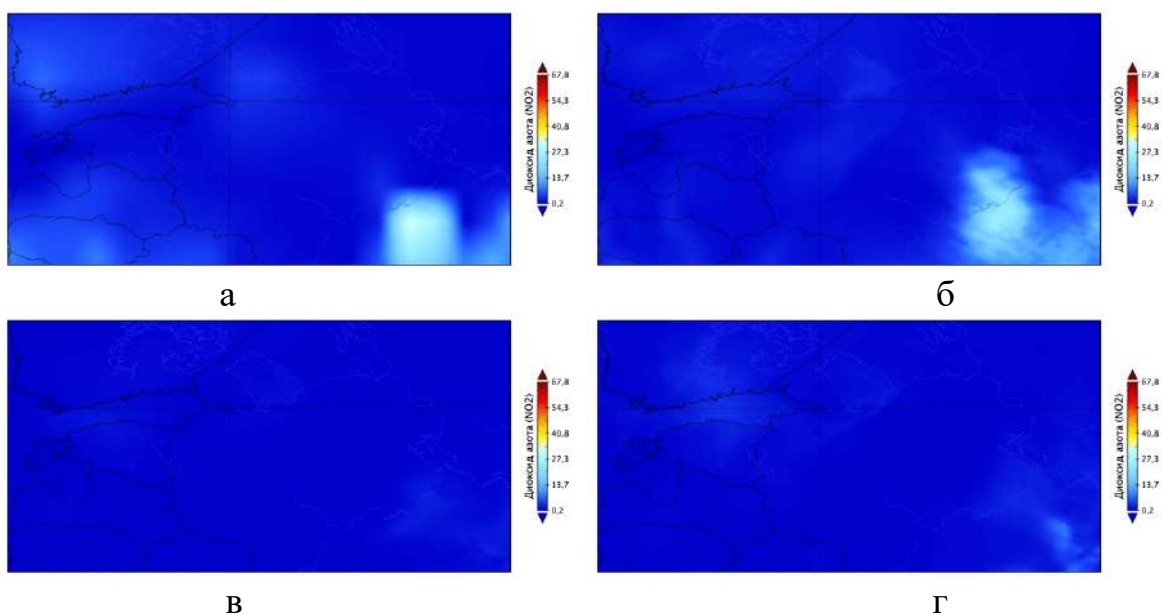


Рисунок 3.16 – Распространение диоксида азота 05.08.2010 года: (а) 00 UTC, (б) 06 UTC, (в) 12 UTC, (г) 18 UTC

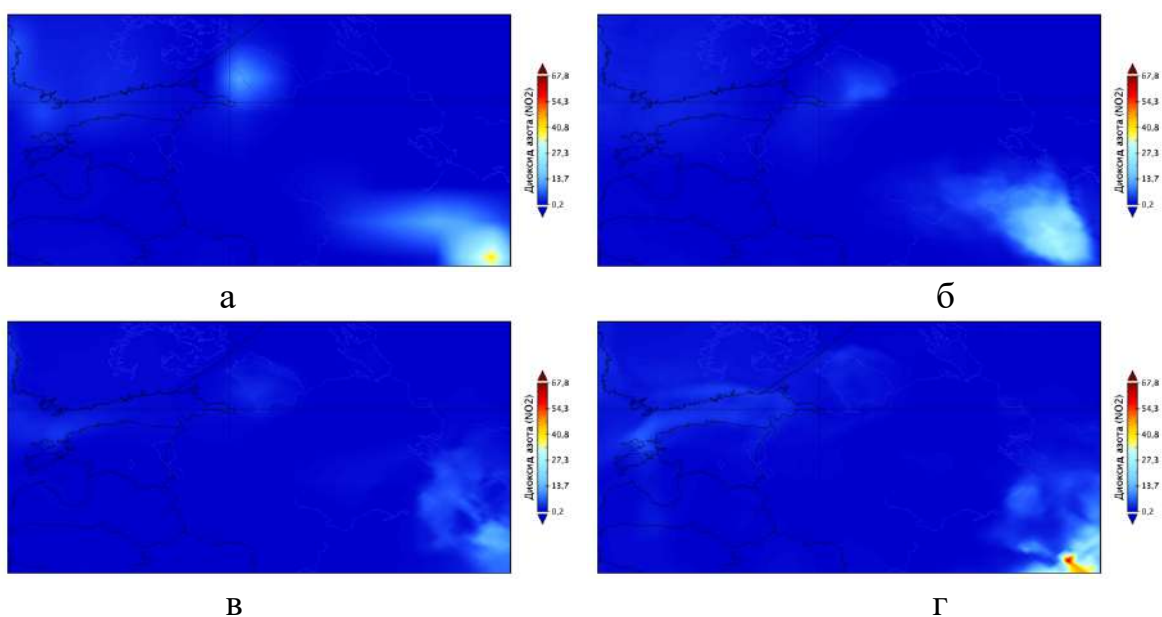


Рисунок 3.17 – Распространение диоксида азота 06.08.2010 года: (а) 00 UTC, (б) 06 UTC, (в) 12 UTC, (г) 18 UTC

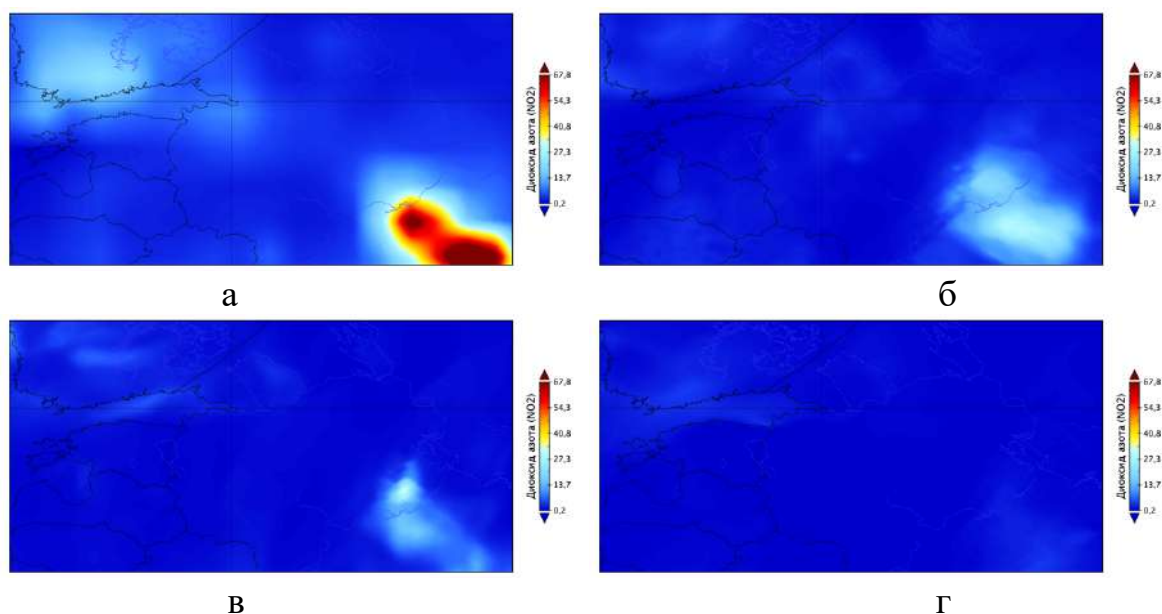


Рисунок 3.18 – Распространение диоксида азота 10.08.2010 года: (а) 00 UTC, (б) 06 UTC, (в) 12 UTC, (г) 18 UTC

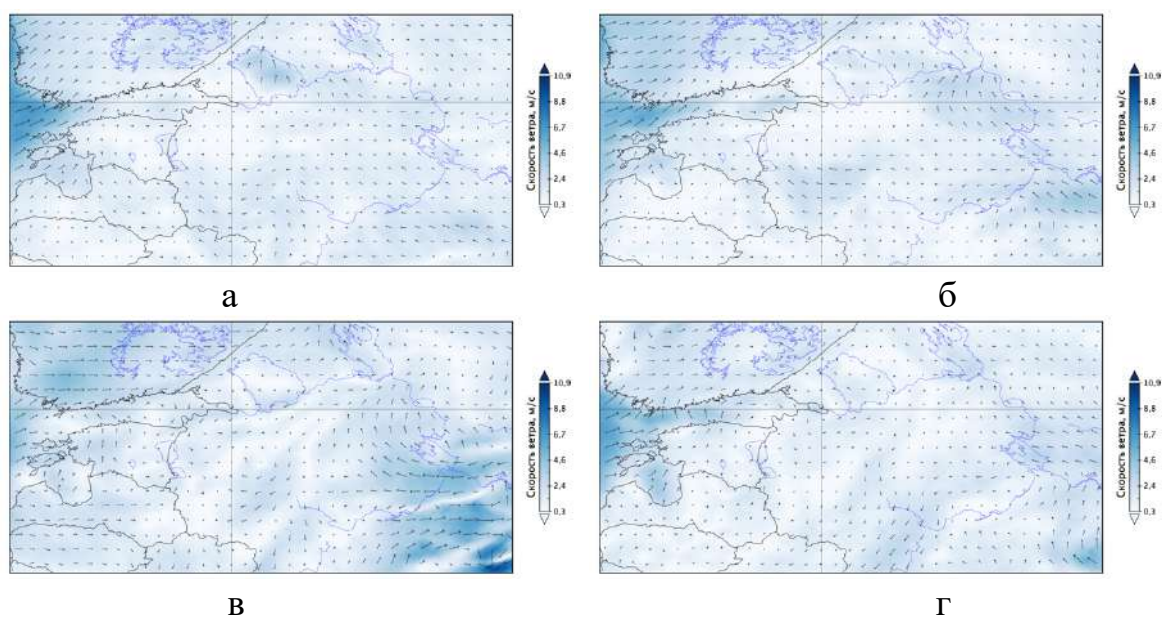
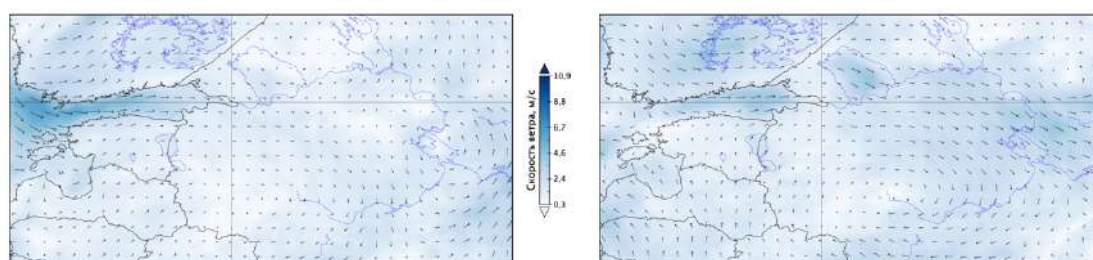


Рисунок 3.19 – Результат моделирования скорости и направления ветра 02.08.2010 года: (а) 00 UTC, (б) 06 UTC, (в) 12 UTC, (г) 18 UTC



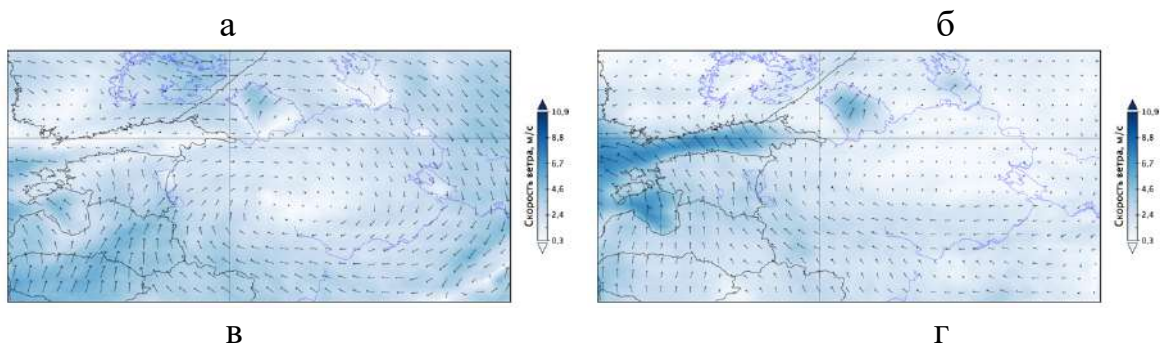


Рисунок 3.20 – Результат моделирования скорости и направления ветра
03.08.2010 года: (а) 00 UTC, (б) 06 UTC, (в) 12 UTC, (г) 18 UTC

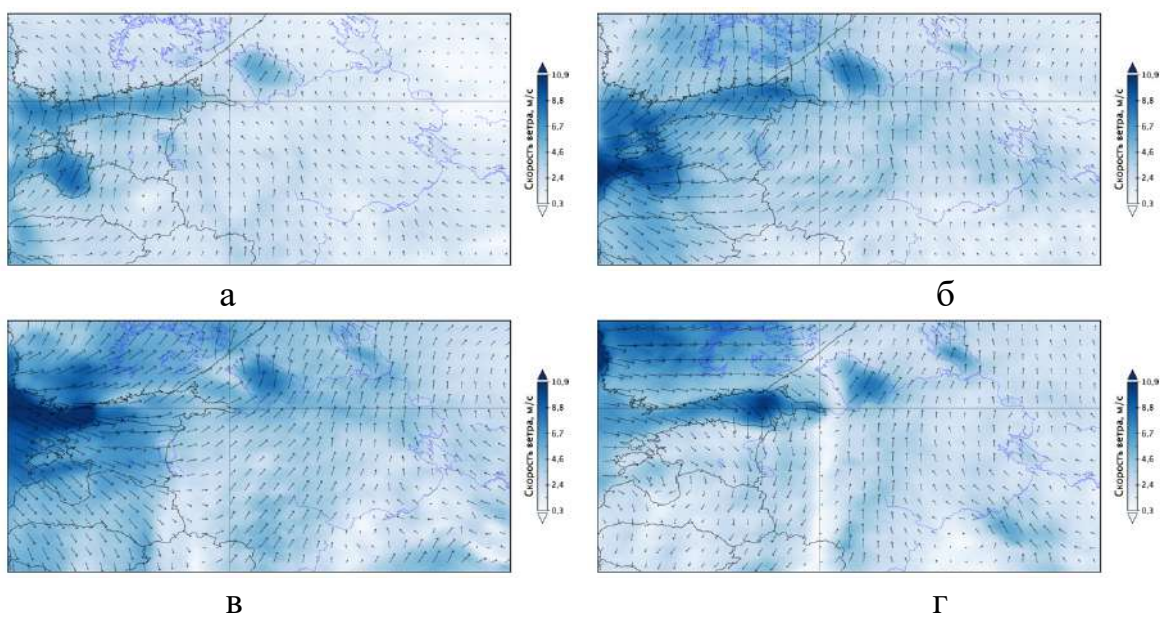


Рисунок 3.21 – Результат моделирования скорости и направления ветра
04.08.2010 года: (а) 00 UTC, (б) 06 UTC, (в) 12 UTC, (г) 18 UTC

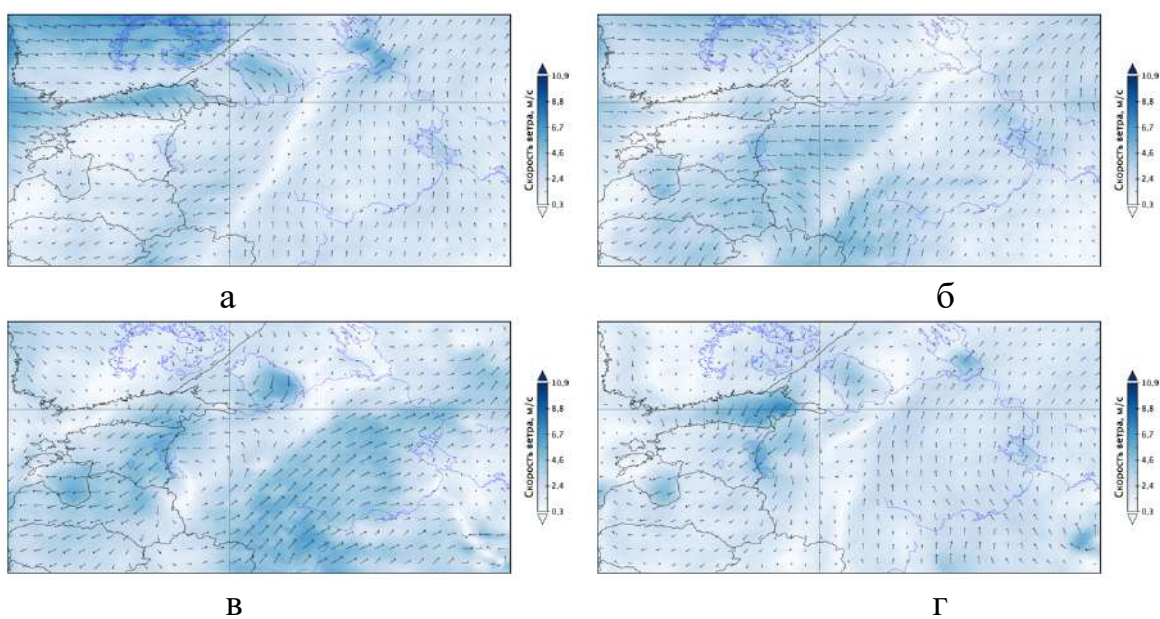


Рисунок 3.22 – Результат моделирования скорости и направления ветра
05.08.2010 года: (а) 00 UTC, (б) 06 UTC, (в) 12 UTC, (г) 18 UTC

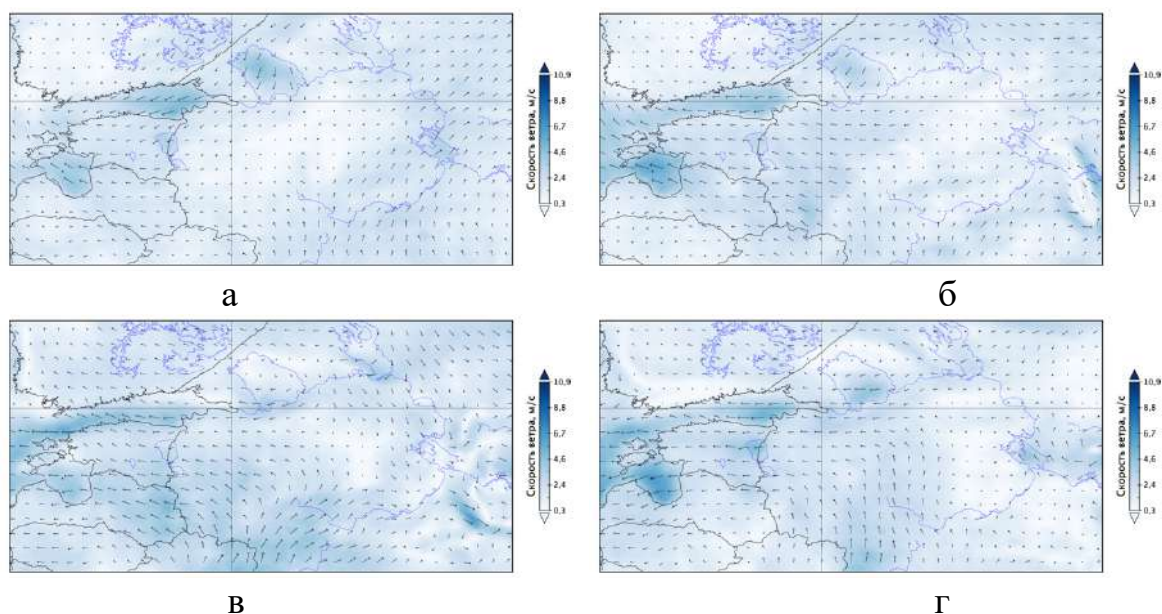


Рисунок 3.23 – Результат моделирования скорости и направления ветра
06.08.2010 года: (а) 00 UTC, (б) 06 UTC, (в) 12 UTC, (г) 18 UTC

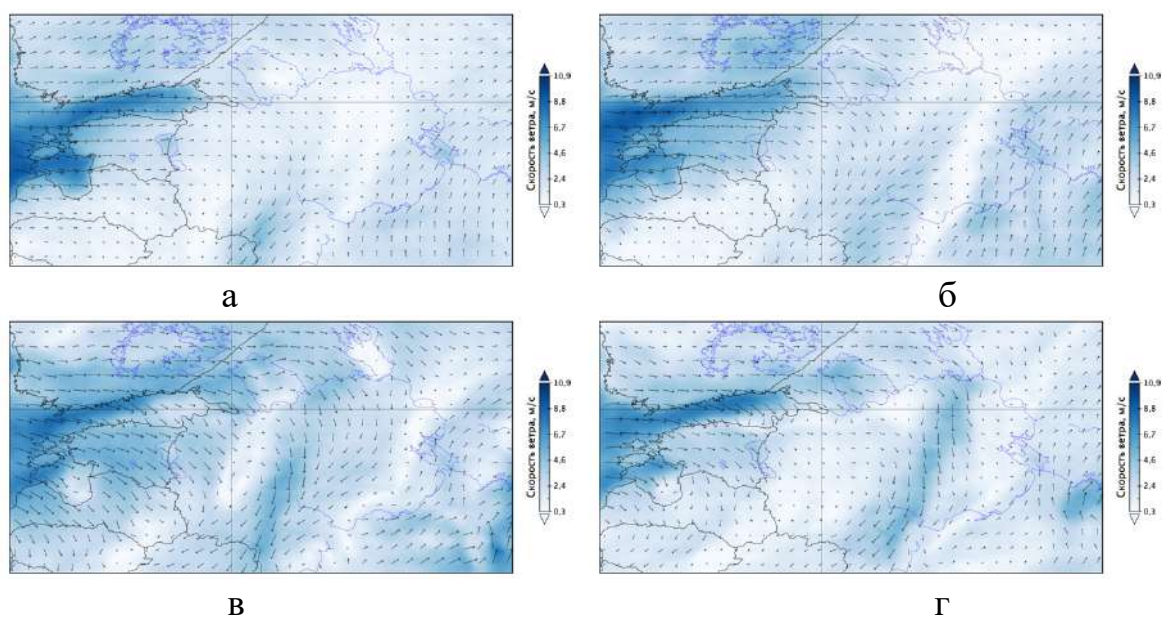


Рисунок 3.24 – Результат моделирования скорости и направления ветра
10.08.2010 года: (а) 00 UTC, (б) 06 UTC, (в) 12 UTC, (г) 18 UTC