



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: «Использование модели Enviro-HIRLAM для исследования
загрязнения воздуха в тропосфере в условиях низких температур в городе
Норильск»**

Исполнитель Габидуллина Светлана Владиславовна
(фамилия, имя, отчество)

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

Мханна Аед Исмаил Назир
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»

И. о. заведующего кафедрой

(подпись)

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

Дробжева Яна Викторовна
(фамилия, имя, отчество)

«06» июня 2024 г.

Санкт-Петербург

2024

Оглавление

СОКРАЩЕНИЯ	3
ВВЕДЕНИЕ	4
Глава 1 . ЗАГРЯЗНЯЮЩИЕ ВЕЩЕСТВА В ГОРОДСКОМ ВОЗДУХЕ	6
1.1. Основные загрязняющие газы.....	10
1.2. Образование сульфатов	15
1.3. Углерод в тропосфере	16
1.4. Зависимость загрязнителей воздуха от метеоэлементов.....	17
1.5. PM2.5 и PM10 фракции.....	19
Глава 2 . ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ ENVIRO-HIRLAM.....	22
Глава 3 . АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ СОДЕРЖАНИЯ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ В Г.НОРИЛЬСК	27
3.1. Загрязнение воздуха при температуре воздуха близкой к среднегодовой январской температуре	29
3.2. Загрязнение воздуха при экстремально низкой температуре воздуха	38
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	47
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	49

СОКРАЩЕНИЯ

PM_{2.5} – взвешенные твердые микрочастицы и мельчайшие капельки жидкости (2,5 мкм в диаметре) engl. particulate matter

PM₁₀ – твердые частицы в воздухе диаметром 10 мкм и менее engl. particulate matter

NO_x – группа оксидов азота

ЛОС – летучий органические соединения

ОС – органический углерод engl. organic carbon

ЧУ – черный углерод

LW – длинноволновые

SO₂ – диоксид серы

SW – коротковолновые

СО – монооксид углерода

ПДК – предельно допустимая концентрация

СИ – стандартный индекс

НП – наибольшая повторяемость

ИЗА – индекс загрязнения атмосферы

СИ – наибольшая измеренная в городе максимальная разовая концентрация примеси, деленная на ПДК

НП – наибольшая повторяемость превышения

ПДК_{МР} – максимальная разовая концентрация вещества

ПДК_{СС} – среднесуточная концентрация

мкм – микрометр

ppbm – это массовое отношение смеси, выраженная в миллиардной доле
engl. parts per billion of masses

мг/м³ – массовая концентрация в миллиграммах на кубический метр

ВВЕДЕНИЕ

С каждым годом всё актуальнее становится изучение загрязнения окружающей среды, особенно это актуально для городских поселений, где высокая плотность населения сочетается с большим количеством источников опасных веществ для здоровья живых существ. Промышленность, выбросы систем отопления и средств передвижения, особенно развитые в крупных городах, приводят к экологически значимому ухудшению качества воздуха. Это выступает не только фактором вреда экосистеме территории, но и причиной снижения безопасности и уровня жизни горожан.

Данная работа ставит своей целью изучение особенностей «поведения» твердых аэрозолей PM_{2.5} в атмосферном воздухе города Норильска при экстремально низких температурах. Что позволит дать актуальное представление об экологической ситуации в данном населенном пункте. Также поднимается тема отличительных черт развития процесса загрязнения атмосферного воздуха в условиях низких температур, которая в дальнейшем может быть развита в контексте других северных городов. Для выполнения поставленной цели необходимо будет выполнить следующие задачи:

- проверить возможности модели Enviro-HIRLAM моделировать глубокую температурную инверсию, формирующиеся в сильные холода,
- сравнить «поведение» загрязнителя воздуха при средних температурах, характерных для декабря в г. Норильск (-20 С°), и экстремально низких (<-30 С°).

Крупным центром цветной металлургии в масштабах российской федерации является город Норильск, расположенный на севере Красноярского

края. В этом городе добываются цветные и драгоценные металлы, сера, селен, теллура и серная кислота. Таким образом крупное месторождение медно-никелевых руд расположено всего в 40 километрах от Норильска, которое находится в ведении ПАО «ГМК Норникель». Многие годы наблюдались повышенные концентрации диоксида серы, взвешенных частиц, никеля, меди и бензопропилена. Что является причиной повышенной заболеваемости и смертности населения. Так существует исследование о качестве здоровья и жизни населения в Норильске в котором приведены расчетные риски от воздействия PM10 и диоксида серы. Согласно этой статьи избыточная смертность жителей Норильска от воздействия SO₂ снизилось на 10% в 2007 г. до 0,8% в период 2014-2019; смертность мужчин от многих причин, в том числе от цереброваскулярных и болезней системы кровообращения, ниже, чем в других населенных пунктах региона, но выше от болезней органов дыхания; среди женщин смертность выше на 16,6%, в том числе от болезней органов дыхания — на 82,7%, от болезней системы кровообращения — на 6,5% [22].

Крупная часть аэрозолей PM10 хоть и влияет на здоровья, однако значительно менее опасное чем более с мелким диаметром. Ежедневно на все случаи жизни смертность, по оценкам, увеличивается на 0,2–0,6% на 10 мкг/м³ PM10 [23]. Долгосрочные воздействие PM2.5 связано с увеличением долгосрочного риска сердечно-легочных заболеваний смертность на 6–13% на 10 мкг/м³ PM2.5 [24-26]. Кроме того, мелкие частицы являются существенным фактором, влияющим на видимость, поскольку эффективность массового подавления PM2.5 в 7 раз выше, чем у более крупных частиц [27,28].

Глава 1. ЗАГРЯЗНЯЮЩИЕ ВЕЩЕСТВА В ГОРОДСКОМ ВОЗДУХЕ

Атмосферный воздух представляет собой смесь газов приземного слоя атмосферы. Известно, что доли азота, кислорода и аргона составляют соответственно 78%, 21% и 1%. В воздухе так же отмечается незначительная концентрация углекислого газа (0,035%), водорода (0,00005%), гелия и других элементов. Качество воздуха обуславливается соотношением тех или иных веществ в атмосфере и от него безусловно зависит качество жизни населения и состояние экосистемы данной территории.

Загрязнением воздуха называется существование в атмосфере компонентов представляющих опасность для здоровья живых существ и климатологической обстановки. Атмосферные загрязнители различаются между собой фазой, в которой они находятся: газы (NH_3 , CO_2 , SO_2 , NO , CH_4 , хлорфторуглероды), биологические молекулы, а также твердые частицы (PM_{10} и $\text{PM}_{2.5}$), делятся еще между собой на происходящие от органических источников и неорганических.

Источниками загрязнения могут выступать как природные резервуары, так и антропогенная деятельность. Оксиды азота NO_x в основном можно классифицировать как возникшие в результате человеческой деятельности, в то время как пыль и SO_2 происходят из смеси антропогенных и природных факторов.

Антропогенные источники в свою очередь можно разделить на стационарные (электростанции, трубы производств, строительство [4], места сжигания мусора [5], тяжелые металлы Pb, Hg, As от промышленности, сельскохозяйственные/лесохозяйственные стратегии основанные на сжигании лесов [7] и отопительные топливные устройства[6]) мобильные (различные средства передвижения) и отдельно выделяют группы загрязнителей, появившиеся не в результате процесса сжигания (выбросы связанные с ведением сельского хозяйства и производства мяса [8] [9]). Мобильные

источники являются наиболее значимым поставщиком NO_2 в городской воздух [1] [2] [3]. К мобильным источникам относятся: CO , оксиды азота, ЛОС, PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$, SO_2 , формальдегида, бензо(а)пирена и соединений свинца; группа не выхлопных выбросов PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$, возникающие в результате износа шин, брекето́в и дорожного покрытия.

Пыль, образующиеся естественным путем в большинстве своем на территории не покрытой растительностью; радон, который является продуктом радиоактивного распада в земной коре; дым от пожаров, значимым компонентом которого является угарный газ CO [12]; морская соль; вулканическая активность [15] [16] [17] - относится к загрязнителям, происходящих от природных источников. Также к данной группе имеет отношение такой примечательный процесс как образование сезонной дымки вторичных загрязнителей: некоторые виды растительности (черная камедь, тополь, дуб, ива) могут выделять экологически значимое количество ЛОС (летучих органических соединений), которые позже реагируют с первичными антропогенными загрязнителями такими как NO_x , SO_2 и антропогенные ОС (органические соединения углерода engl. organic carbon) и таким образом не только образуется дымка [14], но и повышается уровень озона - как продукт, образующийся в процессе фотохимических реакций в атмосферном воздухе [10][11][13].

Загрязнители классифицируются как первичные и вторичные. Загрязняющее вещество, образованное в результате процесса, и еще не вступившее в реакцию с окружающей средой считается первичным загрязнителем. К этому виду компонентам ущерба окружающей среды относятся: пепел от извержения вулкана, CO и NO_2 как продукты сгорания топлива, CO_2 , метан CH_4 , образующиеся в процессе жизненного цикла болот или при производстве мясной продукции, морская соль, NH_3 , хлорфторуглероды, ЛОС, SO_2 и другие оксиды. Вторичными же называются соединения, которые являются продуктами химических реакций между

первичными загрязнителями и окружающей средой - O_3 и составляющие фотохимического смога. Некоторые загрязнители можно отнести сразу в обе группы, что связано с несколькими путями их образования. Так, например РМ, каждая из фракций которого ассоциируется с источником загрязнения [19][20], однако РМ_{2.5} принимает активное участие в фотохимических реакциях [18].

Из краткого обзора совмещенного доклада Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, ФГБУ «Среднесибирское УГМС» и Территориальной центра по мониторингу загрязнения окружающей среды - «Состояние загрязнения окружающей среды на территории Красноярского края за 3 кв 2017 г.» не только можно почерпнуть сведения о качестве воздуха г. Норильска, но и популярную методику оценки атмосферного загрязнения. Которая основывается на значениях измеренных концентраций примесей (в mg/m^3), которая сравнивается с ПДК (предельно допустимая концентрация). Из документа РД 52.04.667.2005 степень загрязнения атмосферы может быть охарактеризована такими параметрами как СИ (стандартный индекс), НП (наибольшая повторяемость), ИЗА(индекс загрязнения атмосферы). СИ - наибольшая измеренная в городе максимальная разовая концентрация примеси, деленная на ПДК. НП - наибольшая повторяемость превышения ПДК. ИЗА - количественная характеристика качества воздуха отдельно взятой примеси, учитывающая различие в скорости возрастания класса опасности веществ, приведенной к вредности диоксида серы (3 класс опасности) по мере увеличения превышения ПДК. Также существует ИЗА основанная на оценки загрязнения по 5 приоритетным компонентам, определяющим состояние атмосферы в данной локации.

Степень загрязнения атмосферы за месяц оценивается по значениям СИ и НП в соответствии с:

Таблица 1.1 - Оценка качества воздуха по критериям

Уровень загрязнения	Значения		
	ИЗА	СИ	НП, %
Низкий	0-4	0-1	0
Повышенный	5-6	2-4	1-19
Высоких	7-13	5-10	20-49
очень высокий	=>14	>10	>50

Таблица 1.2 - ПДК некоторых загрязняющих веществ в атмосферном воздухе городских и сельских поселений [21]

Наименование вещества	формула	ПДК, мг/м ³		Класс опасности
		макс. разовая	средне суточная	
Азота диоксид	NO ₂	0,2	0,04	3
Азотная кислота	HNO ₃	0,4	0,15	2
Азот (II) оксид	NO	0,4	0,06	3
Аммиак	NH ₃	0,2	0,04	4
Бензол	C ₆ H ₆	0,3	0,1	2
Взвешенные вещества(1)		0,5	0,15	3
Взвешенные частицы PM10(2)		0,3	0,06	
Взвешенные частицы PM2.5(3)		0,16	0,035	
Озон	O ₃	0,16	0,03	1
Сера диоксид	SO ₂	0,5	0,05	3
Серная кислота	H ₂ SO ₄	0,3	0,1	2

Углерода оксид	CO	5,0	3,0	4
Хлорацетилхлор ид	C ₂ H ₂ Cl ₂ O	0,05		4

(1)- Недифференцированная по составу пыль (аэрозоль), содержащаяся в воздухе населенных пунктов. ПДК взвешенных веществ не распространяются на аэрозоли органических и неорганических соединений (металлов, их солей, пластмасс, биологических, лекарственных препаратов и др.), для которых устанавливаются соответствующие ПДК.

(2)- Среднегодовая концентрация - 0,04 мг/м³

(3)- Среднегодовая концентрация - 0,025 мг/м³

Нормативы ПДК утверждаются в законодательных документах и контролируется Роскомнадзором посредством регулярным токсикологическим исследованиям. ПДК устанавливается для людей, которые наиболее подвержены влиянию химикатов (детей, пожилых людей, людей с заболеваниями дыхательной системы и т.д.), а также этот критерий отдельно существует для воды, почвы и продуктов питания.

ПДК вредных веществ в атмосферном воздухе бывает разная: ПДКМР – максимальная разовая концентрация вещества. Она не должна влиять на живые организмы в течение 20–30 минут; ПДКСС – среднесуточная концентрация. Эта ПДК не должна оказывать отрицательного воздействия на живые организмы в течение неопределенно долгого времени.

Загрязнение атмосферного воздуха в результате переноса вредных веществ, источник которых находится на другой территории, называется трансграничным. Отдельные загрязняющие вещества могут переноситься на сотни и тысячи километров [29]. Трансграничное определяется такие параметрами как скорость окисления и размер аэрозолей.

1.1. Основные загрязняющие газы

Антропогенное загрязнение происходит из нескольких источников, включая средства передвижения, производство энергии, сельское хозяйство, системы давления и промышленные производства. Эти загрязняющие вещества включают твердые частицы (PM), диоксид азота (NO₂), оксид

углерода (CO), диоксид серы (SO₂) и озон (O₃), и их концентрацию стараются регулировать во многих странах мира.

Таблица 1.3 - Загрязняющие газы и урон, который они наносят окружающей среде и здоровью человека

Загрязнитель	общие источники	экологические риски	риски для здоровья человека
окись углерода CO	автомобильные выбросы, пожары, промышленность	способствует образованию смога	усугубляет симптомы сердечно-сосудистых заболеваний, такие как боль в груди; может вызвать проблемы со зрением и снизить физические и умственные способности у здоровых людей
оксиды азота NO _x	автомобильные выбросы, электроэнергия, промышленность	повреждение листвы; способствует образованию смога	воспаление и раздражение дыхательных путей
диоксид серы SO ₂	энергетика, сжигание ископаемого топлива, промышленность, выбросы автомобилей	основная причина помутнения; способствует образованию кислотных дождей, которые впоследствии повреждают листву, здания и памятники; реагирует с образованием твердых частиц	затрудненное дыхание, особенно у людей с астмой и сердечно-сосудистыми заболеваниями
Озон O ₃	NO _x и ЛОС промышленные и	нарушает способность растений	снижение функции легких; раздражение и

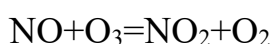
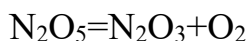
	автомобильные выбросы, пары бензина, химические растворители, энергетика	фотосинтезировать, что приводит к повышенной восприимчивости к другим факторам окружающей среды	воспаление дыхательных путей
--	--	---	------------------------------

Оксид углерода (СО) — это химически активный примесный газ, который имеет и антропогенный источник и естественный. Сейчас в результате деятельности человека приходится 60% выбросов, а оставшаяся часть происходит от природных процессов [55]. СО быстро удаляется из атмосферы (срок жизни 2 месяца) двумя путями: геохимическим окислением атмосферными гидроксильными радикалами (85%) и биологическое окисление почвенными микроорганизмами (10%) [55][56]. СО косвенно воздействует на радиационный баланс за счет повышения концентрации прямых парниковых газов, включая CH_4 и O_3 . СО вступает в химическую реакцию с другими веществами атмосферы в первую очередь с гидроксильным радикалом ОН, которые в противном случае разрушили бы метан. В результате естественных процессов в атмосфере он окисляется до CO_2 и озона [57]. Благодаря длительному времени жизни в средней тропосфере оксид углерода также используется в качестве индикатора шлейфов загрязняющих веществ [58].

Два основных загрязнителя городского воздуха NO_2 SO_2 . Это наиболее активные вещества в промышленном смоге, которые можно распознать по запаху и внешнему виду. Они являются компонентами многих химических реакций в ходе которых образуются серная, азотистая и азотные кислоты, а также являются основными причинами кислотных дождей. Эти газы - индикаторы уровня загрязнения из-за удобства обнаружения, также по их доле в общем составе воздуха можно судить о источниках.

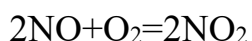
NO₂ - оксид азота IV - особо токсичный газ и главный источник образования нитратов, которые составляют большую часть PM_{2.5}. Распознать по внешнему виду можно по таким признакам: тяжелый газ рыжего цвета (летом в больших концентрациях, при низкой температуре теряет цвет), удушливый, по резкости похож на хлор.

В атмосфере известны несколько оксидов азота, многие из которых впоследствии проходят полную диссоциацию с образованием NO NO₂. Также известен N₂O, но согласно исследованиями Гуди и Уошлоу [38] фотохимическое образование этого оксида и не имеет большого значения еще и потому, что реакции образования происходят в стратосфере, а основной его источник - почвы.

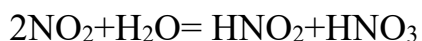


NO, NO₃, N₂O₅ тоже встречаются в атмосфере, но определить непосредственно невозможно, однако оценки скорости реакции дают понять, что их концентрация составляет несколько процентов от концентрации NO₂ [36].

Оксид азота на воздухе быстро окисляется до диоксида.



Пары последнего тяжелее воздуха. При взаимодействии с водой диоксид образует азотную кислоту.



Так же он образуется при разложении концентрированной азотной кислоты на свету.

NO₂ может выделяться также в качестве побочного продукта на химических предприятиях. Также источниками двуокиси азота является автомобильный транспорт, что подтверждает повышенная концентрация оксида азота у дорог [40-42].

Так же Рейтер Р. и Рейтер М. [43] объясняют факт высокого содержания нитратов в осадках, выпадающих в горах тем что атмосферное электричество способствует реакции оксида азота с кислородом и возникновением таким образом NO_2 . Из исследований [44] концентрации NO_2 на Цугшпитце увеличивались пропорционально турбулентности в нижних слоях атмосферы из чего можно сделать вывод о почве как источнике двуокиси азота. Однако стоит отметить небольшую роль этих источников в городском смоге.

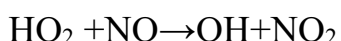
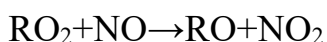
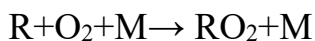
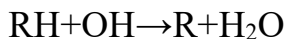
Благодаря источникам упоминаемых ранее существует естественный фон с концентрацией, однако данные полученные Рейнольдсом еще в 1930г. [45] говорят о том, что основным источником NO_2 является человеческая деятельность.

Несмотря на то, что тропосферный озон составляет лишь 1,5 % от общего объема озонового столба, он очень важен, потому что влияет на климат, так как сам является парниковым газом, к тому же его фотолиз УФ-излучения в реакции с водой влияет на климат. Фотохимическая реакция является основным источником гидроксильных радикалов (ОН), а они в свою очередь отвечают за окислительное удаление многих следовых газов, таких как метан (CH_4), гидрофторуглероды (HFCs) и гидрохлорфторуглероды (HCFCs), которые влияют на климат и важны для стратосферного озонового слоя.

Тропосферный озон образуется в результате двух процессов: нисходящего потока из стратосферы и фотохимического производства. В результате окисления углеводородов и (СО) в присутствии NO_x . Стоком озона является химический путь и поглощение на поверхности земли. Роль фотохимии в локальном балансе озона сильно зависит от концентрации NO_x . Антропогенное влияние на концентрацию озона заключается в выбросе NO_x , СО и углеводородов.

Образование озона в тропосфере происходит в результате сложной серии реакций называемых «механизмом фотохимического смога». Основные механизмы образования озона этим способом были представлены Хааген-

Смитом [52] в исследованиях загрязнения воздуха в Лос-Анджелесе в 1950-х годах. Туда же входит фотоокисление ЛОС и СО в присутствии NO_x. Этот механизм подробно показан ниже:



Где в результате реакции между углеводородом (RH) и гидроксильным радикалом (OH) приводит к образованию двух молекул O₃ и альдегида R'CHO или кетона. Дополнительные молекулы озона могут быть получены в результате разложения R'CHO.



В условиях городского воздуха СО служат топливом для производства тропосферного озона и расходуются в процессе. Олефиновые и ароматические углеводороды (часто, но не исключительно антропогенного происхождения) обычно играют доминирующую роль, в то время как вдали от города реактивные биогенные ЛОС, такие как изопрен, выходят на передний край [53][54]. В отличие от углеводородов и СО, NO_x сохраняется в процессе производства озона и, таким образом, действует в качестве катализатора. Преобразование NO в NO₂ под действием пероксильных радикалов (HO₂ и RO₂) является решающим поскольку при быстром фотолизе NO₂ образуется атом кислорода, необходимый для образования озона (HO₂ и RO₂).

1.2. Образование сульфатов

Сера в атмосфере присутствует в основном в трех формах SO₂, H₂S и сульфаты SO₄. Большая часть естественной серы попадает в виде H₂S, который

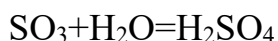
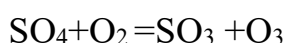
образуется вследствие восстановления сульфатов при разложении органических веществ. Источники же SO_2 принято считать антропогенными, так как концентрация в сельских районах всегда меньше чем в промышленных и увеличивается лишь в начале сезона отопления [46].

Сернистый газ является продуктом сгорания топлива. Поступление его в атмосферу оценивают, как преимущественно результат сжигания топлива [47].

Крупным источником сульфатов является море и согласно исследованию [48] концентрация сульфата падает при движении от побережья вглубь континента.

Анализ осадков [48] показывает, что промышленная сера составляет 30% от количества, которое выпадает с дождями, причем над сушей в гораздо большем количестве чем над морем. Так можно сделать вывод что, над континентом сульфаты – продукт окисления сернистого газа в основном.

Процесс окисления SO_2 в фотохимическом смоге может быть описан реакциями Герхарда и Джонстона [49]. Газоброобразная SO_2 окисляется в течении нескольких часов или дней до образования серной кислоты, если имеются катализаторы скорость реакции увеличивается, капельки H_2SO_4 обрастают водяным паром. В ходе в этих реакций образуются сульфаты.



По результатам изысканий Коера [50] SO_4 всегда образуется в атмосфере при конденсации водяного пара. Это можно объяснить присутствием взвешенных частиц в атмосфере. Юрон [51] что в условиях отсутствия источника света сернистый газ довольно быстро окисляется в присутствии оксидов различных металлов таких как Al, Ca, Fe, Cu, Mn.

1.3. Углерод в тропосфере

Черный углерод (ЧУ), важный компонент мелких твердых частиц $\text{PM}_{2.5}$, в основном образуется в результате неполного сгорания топлива, например

дизельного топлива, бензина, угля и биомассы. Основным источником считается дорожное движение, но зимой также важнейшим источником являются системы отопления. ЧУ является светопоглощающим компонентом аэрозолей, то есть является нагревающим фактором для атмосферы, таким образом влияющим на радиационный баланс. По оценкам, ЧУ является вторым наиболее важным фактором после углекислого газа, который способствует глобальному потеплению за счет прямого воздействия [84,86].

Общий углерод в атмосфере подразделяется на черный, органический и карбонатный. Источники органического углерода потенциально возникают в результате процессов, включающих химические реакции углеводородов [85]. Природными резервуарами являются почва и водоемы этим обуславливается и колебания содержания органического углерода, зависящие от сезона [86]. Однако и антропогенный источник органического углерода существует - это дорожный транспорт [85]. Органический углерод оказывает отрицательное воздействие на радиационный баланс, он отражает солнечную радиацию и приводит к охлаждению [88]. Этот вид углерода также бывает водорастворимым и нет.

1.4. Зависимость загрязнителей воздуха от метеозлементов

Синоптические процессы играют большую роль в распространении, накоплении или удалении загрязняющих веществ в атмосфере. Ветер, осадки, температурные инверсии влияют на концентрацию атмосферных газов и твердых веществ.

Ветер: наибольшая концентрация загрязняющих компонентов в городском воздухе наблюдается при скорости ветра 0–1 м/с [59, 60]. Это связано с так называемым застоем воздуха, часто обусловленном подземными инверсиями температуры. Слой инверсии блокирует вертикальные потоки выбросов, таким образом загрязнение скапливается у источников.

Как видно из исследования городского воздуха г. Москвы [61] приземная концентрация NO, CO (первичные загрязнители тк продукты сгорания) и NO₂

(вторичный продукт сгорания) обратно пропорциональны скорости ветра. Связывается это с ростом турбулентного обмена, который посредством перемешивания слоев воздуха вызывает рассеивание малых газов в вышележащие слои, выводя из таким образом из приземного слоя. Второй причиной также может быть сильный горизонтальный перенос где загрязненный московский воздух заменяется более чистым областным. Максимум содержание наблюдается при предельно слабом ветре от 0 до 1 м/с на уровне 40м, так как основной источник находится в нижнем слое атмосферы - двигатели автомобилей.

SO₂ отличается немонотонной функцией относительно скорости ветра, что связано с источником этого вещества - трубы теплоэлектростанций. Так наибольшая приземная концентрация наблюдается при ветре 1-2 м/с. Что может быть связано с тем фактом, что при полном штиле струя от трубы поднимается выше, и горизонтального перемещения не происходит, таким образом приземное содержание небольшое [62, 63].

Приземный озон имеет противоположную зависимость от ветра, так чем больше скорость ветра тем больше содержание O₃ у земли. Это связано с вертикальным перемешиванием при сильном ветре, которое приводит к затоку O₃ из вышележащих слоев. Озон имеет особенность распределения: понижение концентрации у земли из-за его осаждения.

Из того же исследования [61] что в диапазоне от -10 до +20 С° зависимости малых газов отсутствуют. При экстремально низких или высоких значениях температуры воздуха происходят достоверные изменения: резкий рост приземного содержания NO, CO и SO₂ в условиях сильных морозов, а также рост приземного O₃ при сильной жаре. Первый эффект очевидно связан с застоем воздуха при приземных инверсиях, с замедлением скорости окисления NO и CO при очень низких температурах.

Динамика значений относительной влажности косвенно отражает условия температурной стратификации. Поэтому связь приземного

загрязнения воздуха с влажностью является опосредованной: чем больше влажность, тем обычно меньше температура и тем чаще наблюдается приземная инверсия, характеризующиеся застоем воздуха. Поэтому зависимости от влажности всех газов, кроме только озона, обычно устойчиво возрастающие до отметки 80% [61] .

Ливневые осадки больше очищают воздух, чем обложные. Анализ результатов наблюдений в рамках исследования качества воздуха города Саратов [64] показал, что повышенная концентрация пыли и SO_2 редко наблюдается после дождя, а удаление их из атмосферы в большой степени зависит от интенсивности и количества выпавших осадков. Скорость уменьшения концентрации сернистого газа увеличивается с возрастанием интенсивности дождя. Концентрация NO_2 и SO_2 , уменьшается при выпадении осадков, а O_3 и другие окислители летом после дождя исчезают из атмосферы почти полностью. При растворении вредных примесей в каплях дождя образуются кислоты, что приводит к выпадению «кислотных» дождей. В случаях трансграничного загрязнения то есть переноса примесей влияние осадков в очищении существенной роли не играют [60].

1.5. $\text{PM}_{2.5}$ и PM_{10} фракции

Частицы PM – взвешенные твердые микрочастицы и мельчайшие капельки жидкости, содержащиеся в воздухе. PM_{10} - эквивалентный аэродинамический диаметр <10 мкм и фракции вдыхаемых частиц высокого риска $\text{PM}_{2.5}$ - эквивалентный аэродинамический диаметр $<2,5$ мкм.

Концентрации $\text{PM}_{2.5}$ непосредственно зависит от промышленности [65] однако стоит отметить что помимо первичных загрязнителей, в состав входят и вторичные. В исследовании прибрежного города Сан-Хосе [66] были

сделаны выводы на тесную связь концентрации хлорида, что указывает на морскую природы, на концентрацию PM₁₀, однако роль антропогенного фактора признана доминирующей. Доминирующую роль в формировании частиц обеих фракций играет антропогенный фактор [77-78], это можно заметить, по тому как вторичные сульфаты и нитраты являются одним из главных компонентов обеих групп, однако органический углерод тоже является значительный компонентом [79-80].

Стоит еще отметить о значительном влиянии метеорологических условий на концентрацию частиц, особенно сильная корреляция наблюдается со скоростью ветра и относительной влажностью, и осадками [67, 68].

С точки зрения взаимосвязи между PM_{2.5} и PM₁₀ доказано, что массовая концентрация PM_{2.5} сильно коррелирует с PM₁₀ [69-72]. Поскольку PM_{2.5} разного размера происходят из разных источников, отношение PM_{2.5}/PM₁₀ можно использовать для идентификации их источников [73]. Более высокое отношение означает преобладающий вклад PM_{2.5}, который обычно приписывают первичному загрязнению в результате антропогенной деятельности и вторичному образованию твердых частиц, таких как NO₃, SO₄, NH₄, и органические вещества, в то время как более низкое соотношение в основном связано с летучей пылью или песчаной пылью от дальнего транспорта [74].

Основными компонентами в составе аэрозолей являются SO₄, NO₃, NH₄ и органический углерод OC, а также тяжелые металлы такие как Pb, Al и Fe. Причем сульфаты являются одним из наиболее доминирующих компонентов в частицах независимо от близости к морю, следом по доле в составе идут нитраты [66-79].

Результаты исследований в Загребе [79] показывают, что почти все хлориды, нитраты и содержание сульфатов обнаружено во фракции взвешенных частиц PM_{2.5}, при том, что средний вклад хлоридов, нитратов и

сульфатов в общее количество частиц до 25%. В докладе [68] замечается, что концентрация Na коррелирует с содержанием PM.

Во всем мире углеродсодержащие материалы считаются основным компонентом PM_{2.5} [82]. Норматив качества воздуха установленный ВОЗ в 2005 г. 10 мкг/м³ [83].

Глава 2. ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ ENVIRO-HIRLAM

Enviro-HIRLAM (Environment-High Resolution Limited Area Model) или Модель Высокого Разрешения на ограниченной области. Является полностью интегрированной системой для моделирования прогноза метеорологический, химической и биологической погоды. Моделирующая система Enviro-HIRLAM была создана в Датском Метеорологическом Институте (ДМИ) в сотрудничестве с несколькими европейскими университетами.

Модель DMI-HIRLAM, основанная на численном прогнозировании погоды, в которую включены в интерактивном режиме перемещения, рассеивания аэрозолей и других загрязняющих воздух веществ, является первоначальной версией численной модели. При усовершенствовании численной модели прогноза химии атмосферы были включены процессы осаждения, прямые источники загрязнения и была усовершенствована динамика аэрозолей, содержащих серу и улучшены обратные связи. Метеорологическую составляющую улучшили вложением численных моделей высокого разрешения структуры планетарного, пограничного и приземного слоев, а также схемы адвекции. В районах высокой урбанизации часть модели, отвечающей за метеорологию, была усовершенствована путем параметризации подслоев городской застройки. Таким образом Enviro-HIRLAM предоставляет метеорологическую информация, включающая поля температуры воздуха, относительной и удельной влажности, атмосферного давления у земли и на высоте, направление и скорость ветра, облачности и турбулентной энергии.

Динамическое ядро основано на полу-лагранжевой схеме адвекции. Ниже приведена схема системы моделирования Enviro-HIRLAM (Рисунок 2.1). [93]

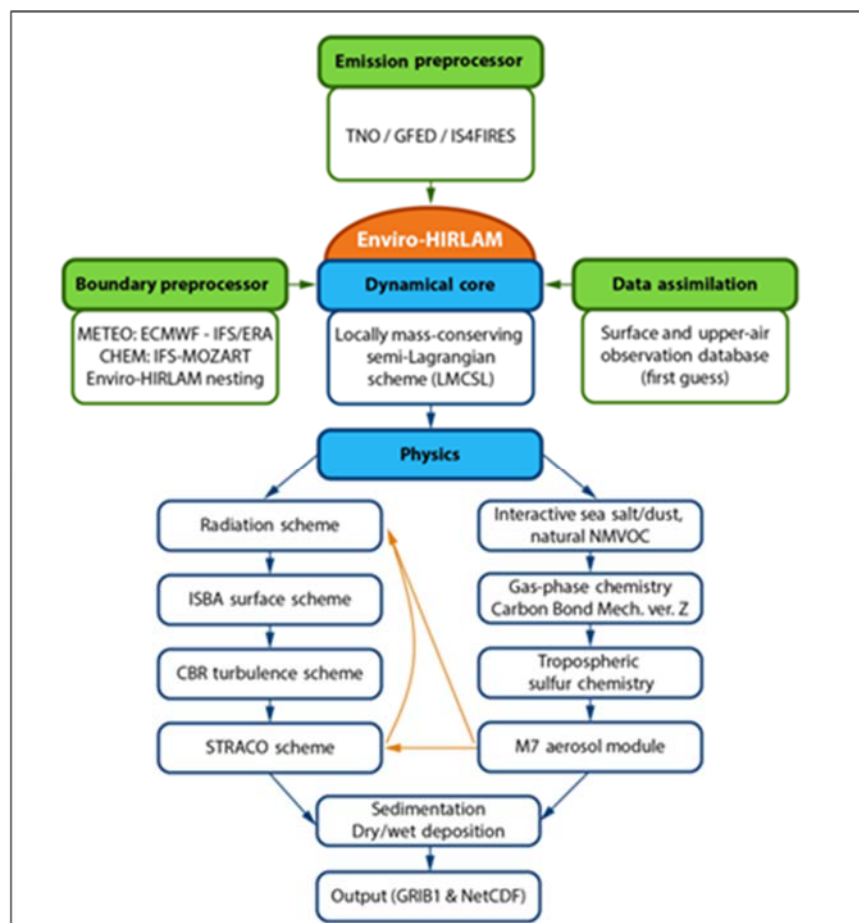


РИСУНОК 2.1 СХЕМА СИСТЕМЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ENVIRO-HIRLAM. [93]

Химия атмосферы в данной модели включают такие элементы:

Модуль тропосферного цикла серы в численной модели Enviro-HIRLAM содержит простую схему химии атмосферы. Используется для долгосрочных прогнозов, и основывается на механизме цикла серы в атмосфере, в котором используются такие виды веществ для прогноза SO_2 , SO_x и диметилсульфид.

Химические решения использованные в Enviro-HIRLAM включают численное интегрирование систему из обыкновенных дифференциальных уравнений для расчета временного развития газофазной химии. Используемый набор уравнений производства и стока аэрозольных веществ в атмосфере с участием солнечного света нуждаются значительных производственных мощностях, потому что именно ими создается вычислительная система.

Скорость фотолиза представляет собой функцию метеопараметров. Для каждого случая скорости рассчитываются индивидуально, используя для этого интерполяция значений из совокупности заранее заготовленных данных.

Такие факторы, как например, количество облачности или угол под каким солнечные лучи падают на землю, все это влияет на оптическую глубину облаков.

В блоке гетерогенной химии в данной модели учитывается растворимость многих газофазных загрязняющих веществ в воде, при этом сульфаты и аммиак являются участником нуклеации. Чтобы охватить указанные процессы в численном прогнозировании погоды «Chem-Liquid» добавлен упрощенный механизм равновесия в жидкой фазе с основными равновесиями. Это является моделью термодинамического равновесия, решением которого будет метод аналитического метода последовательных приближений равновесия.

Рассматриваются такие виды частиц: нерастворимые и смешанные (водорастворимые) частицы. С помощью «псевдомодального» подхода частицы были классифицированы на семь групп по принципу размера частиц и растворимости, три из которых являются нерастворимыми, остальные – представители смешанной группы. Преобладающими аэрозольными частицами признаны черный углерод (ЧУ), первичный органический углерод (ОС), сульфаты, минеральная пыль и морская соль.

Сухое осаждение различных атмосферных газов и взвешенных частиц вычисляется из аэродинамического, квазиламинарного пограничного слоя как произведение концентрации в приземном слое и потока сухого осаждения. Модель включает себя влажного осаждения в варианте расчета осаждения при использовании определенные параметры поглощения аэрозолей, которые рассчитываются в зависимости от состава и диаметра частиц, а так же учитываются характеристики облачности.

Модуль по обработке выбросов представляет и численные наборы данных, и обработка спутниковых и наземных наблюдений. Так же включены

в такие источники как естественные потоки как пожары, и антропогенные выбросы газов и аэрозолей.

Также за механизм обратной связи принимаются: прямые и полупрямые эффекты, первый и второй косвенным эффектам. При первом типе реализуются путем модификации радиационной схемы Савиярви с внедрением новых быстрых аналитических коротковолновых (SW) и длинноволновых (LW) аэрозольных коэффициентов пропускания, отражения и поглощения (см. рисунок 3.2(а) и 3.2(б)). При втором прогноз полей аэрозоли связаны с физическими и микрофизическими свойствами облаков. А именно количество капель в облаке рассчитывается на основе размера, количества и растворимости аэрозолей, а поле пресыщения подсечного слоя STRACO используется в качестве основы для расчета зарождения капель.

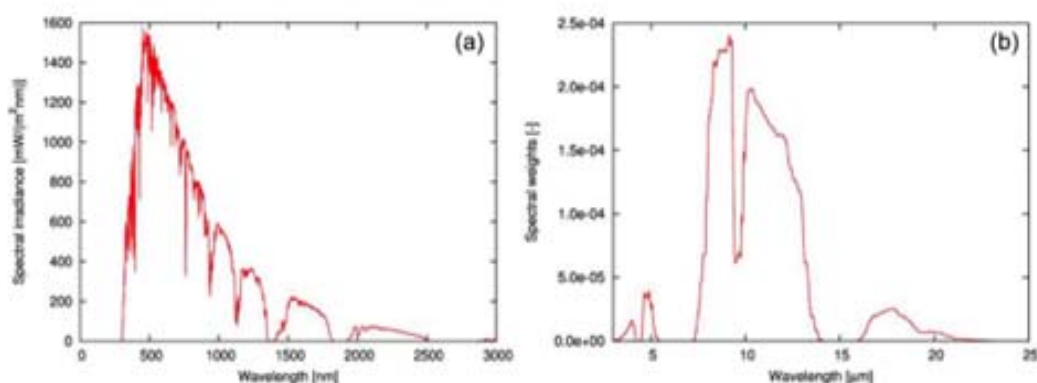


РИСУНОК 2.2 – (А) ТИПИЧНЫЙ КОРОТКОВОЛНОВЫЙ СПЕКТР (SW), ИСПОЛЬЗУЕМЫЙ ДЛЯ РАСЧЕТА СРЕДНИХ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КОРОТКОВОЛНОВЫХ АЭРОЗОЛЕЙ (SW), (Б) СПЕКТРАЛЬНЫЕ ВЕСА, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДЛЯ РАСЧЕТА СРЕДНИХ ДЛИННОВОЛНОВЫХ АЭРОЗОЛЬНЫХ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ (LW).

Территории высокой урбанизации в модели Enviro-HIRLAM представлены таким образом: 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.

Задачи, которая способна выполнять модель: 1. прогнозирование химической погоды; 2. долгосрочная оценка качества и химического состава воздуха; 3. прогноз погоды; 4. прогнозирование содержания и миграции пыли и биоаэрозолей; 5. моделирование изменения климата и исследования влияния изменения климата на загрязнение атмосферы в различных масштабах; 6- антропогенный след; 7- геоинженерия; 8- загрязнение при извержениях вулканов, песчаных и пыльных бурь, ядерных взрывов, моделирование и в целом подразумевает готовность к другим чрезвычайным ситуациям [94].

Глава 3. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ СОДЕРЖАНИЯ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ В Г.НОРИЛЬСК

Норильск - город с населением 176 тыс. человек является крупным промышленным центром и одним из самых загрязненных населенных пунктов по качеству воздуха. Город Норильск входит в перечень городов – участников реализации федерального проекта «Чистый воздух».

В исследовании [92], выпущенном в 2021 году, проводились оценки риска здоровью населения Норильска от воздействия загрязняющих веществ и были сделаны такие выводы: в качестве приоритетных загрязнителей должны рассматриваться оксид меди, оксид никеля, диоксида серы, серной кислоты, хрома (VI), отдельных видов производственной пыли, включая пыль неорганическую (до 20% SiO₂), пыль неорганическую (20–70% SiO₂) и прочие взвешенные вещества. Представляющими наибольший риск здоровью горожан являются такие соединения как оксид меди, оксид и сульфат никеля, свинец его соединения, оксиды азота, серная кислота, серы диоксид, углерода оксид, бензол, сумма всех видов производственной пыли (взвешенные вещества).

Доминирующими источниками в этом же исследовании [92] отмечены ЗФ ПАО «ГМК «Норильский никель», существенный вклад в условия риска здоровью также внесли АО «ТГК Норильская нефтебаза», ООО «Медвежий ручей», Механический завод и Завод строительных материалов ООО «НОК». Структура и интенсивность транспортного движения в границах жилой застройки не является решающим фактором для степени опасности здоровью, следовательно и их изменения, не окажет существенного влияния на риски для населения. Проводимые в указанной работе [92] расчеты, с учетом выбросов от мобильных источников, указывают на то что вклад автотранспорта в

канцерогенный риск составляет 1,46% (фактор риска здоровью – формальдегид).

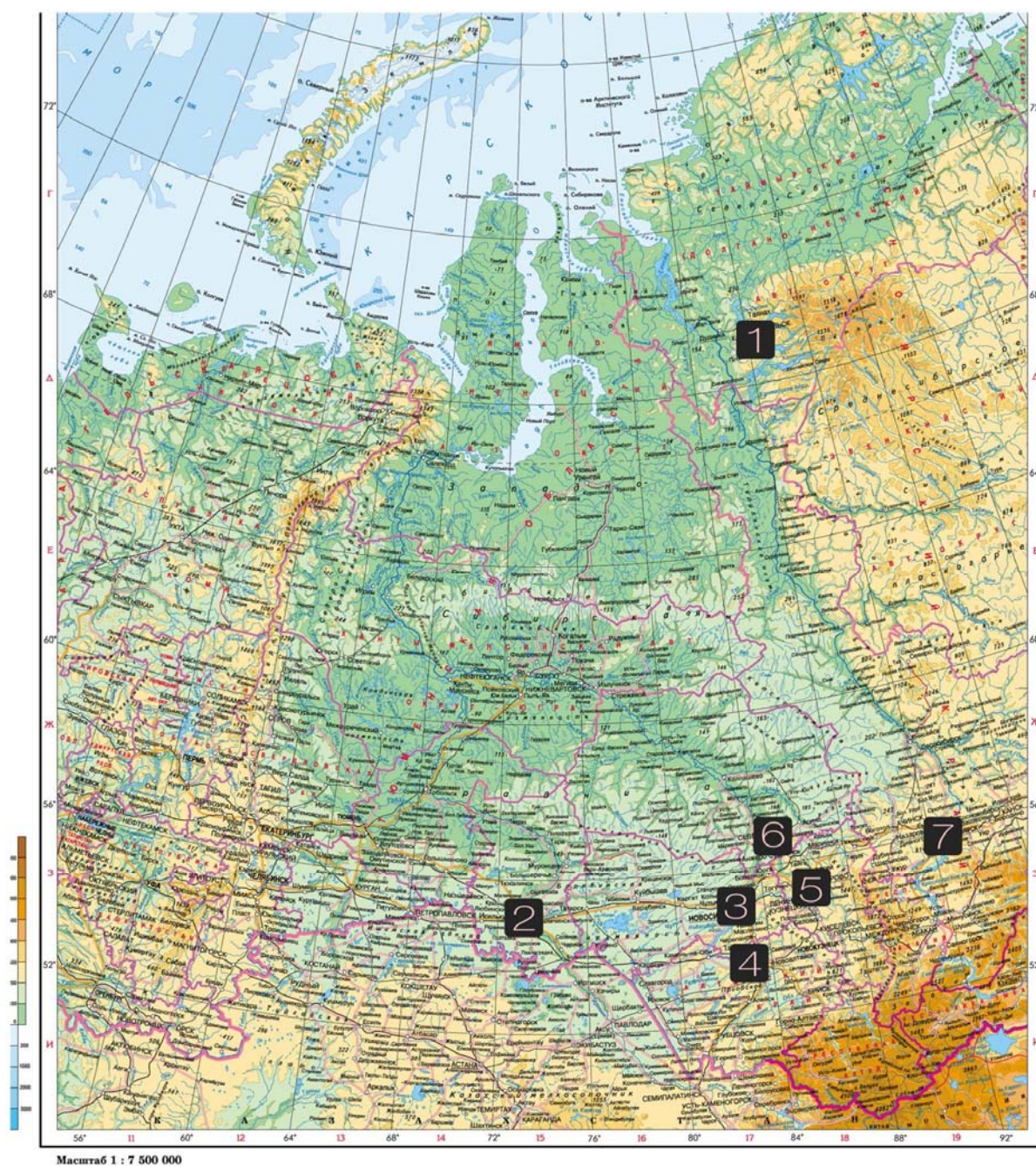


Рисунок 3.1- ФИЗИЧЕСКАЯ КАРТА Западной Сибири: 1- Норильск; 2- Омск; 3- Новосибирск; 4- Барнаул; 5- Кемерово; 6- Томск; 7- Красноярск

В ходе данной работы были проанализированы январь 2010 года. Ниже будут представлены результаты по наиболее показательным датам, а именно: с 28.01.2010 по 29.01.2010 как самые холодные сутки; с 19.01.2010 по 20.01.2010 как даты с температурой близкой к среднегодовой за январь.



РИСУНОК 3.2 - ГРАФИК ХОДА ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА ЗА ЯНВАРЬ 2010 Г. В Г. НОРИЛЬСК

График хода температуры в январе построен по архивам данных наблюдения, взятым с сайта [90], поэтому срок наблюдения указывается в соответствии с местным временем, то есть +7ч (UTC). Средней температурой за указанный период является $-28,6\text{ С}^{\circ}$, в то время как среднегодовая за январь равна -24 С° [89]. Ветер за январь 2010г. преимущественно юго-восточного направления, средняя скорость ветра 5,5 м/с, а штиль наблюдался в 13,2% случаев. Более подробные обзоры погоды будут содержать пункты, содержащие анализ визуализированных данных модели Enviro-HIRLAM в указанные ранее даты.

3.1. Загрязнение воздуха при температуре воздуха близкой к среднегодовой январской температуре

Как видно из представленных ниже метеоданных, наблюдаемых в сутки с 19 по 20 января, происходило потепление, с достаточно высокой скоростью ветра и постоянным умеренным снегом, также наблюдается поворот ветра.

Таблица 3.1 - Обзор фактической погоды за срок с 19 по 20 января 2010 г (время указано местное). [90]

числа	часы	температура воздуха (С°)	атмосферное давление (гПа)	барическая тенденция	направление	скорость ветра (м/с)	погода за прошедший срок
19	01	-27,6	1021,2	-1,9	вюв	9	Непрерывный умеренный снег
	04	-25,8	1019,3	-0,3	вюв	10	Непрерывный слабый снег
	07	-23,7	1019,1	-0,4	юв	9	Непрерывный слабый снег
	10	-21,9	1018,7	-0,7	юв	9	Непрерывный умеренный снег
	13	-21,0	1018,0	-0,1	вюв	8	Непрерывный умеренный снег
	16	-19,3	1017,9	1,1	вюв	9	Непрерывный умеренный снег
	19	-18,9	1018,9	0,5	вюв	8	Непрерывный умеренный снег
	22	-18,1	1019,5	0,7	ююв	4	Непрерывный умеренный снег

20	04	-5,3	1020,1	0,4	з	9	Слабый ливневый снег
	07	-6,5	1020,5	0,7	з	12	Слабый ливневый снег
	10	-6,4	1021,2	0,0	зюз	11	Слабый ливневый снег
	13	-5,3	1021,2	-0,4	з	10	Слабый ливневый снег
	16	-4,7	1020,8	1,3	зсз	12	Умеренный или сильный ливневый снег
	19	-5,4	1022,1	0,5	зсз	10	Умеренный или сильный ливневый снег
	22	-10,0	1022,7		з	11	Слабый ливневый снег

На рисунке 3.3 представлен график профиля температуры воздуха, для построения которого использовались данные находящиеся в открытом доступе на сайте [91]. На рисунке 3.4 представлен температурный профиль на основе данных моделирования Enviro-HIRLAM. Данная модель использует для расчета вертикального распределения метеозлементов и химии атмосферы модельные уровни. Чтобы перейти от них к привычным нам уровням, основанным на атмосферном давлении, необходимо воспользоваться переводными коэффициентами $P(i)=A(i)+B(i)*P_a$, где (i) - номер модельного уровня, А и В коэффициенты, P_a - давление на поверхности земли в данной

точке. Как видно из рисунков 3.3 и 3.4 модель достаточно точно строит температурную инверсию, наблюдавшуюся в указанный срок в высоту до 12 км, так как выше фактических данных мы не имеем. Из чего можно сделать вывод о том, что использовать Enviro-HIRLAM для моделирования загрязнения атмосферы в этот срок имеет смысл.

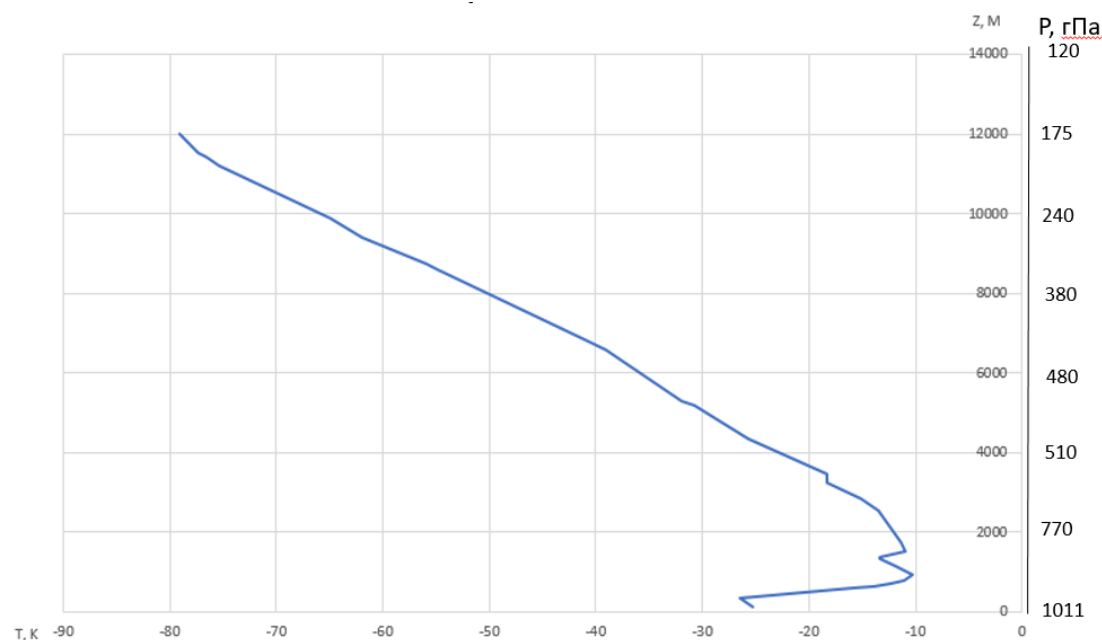


РИСУНОК 3.3 - ГРАФИК ФАКТИЧЕСКОГО ВЕРТИКАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА (С°) 19 ЯНВАРЯ 2010Г. В 00Ч (UTC)

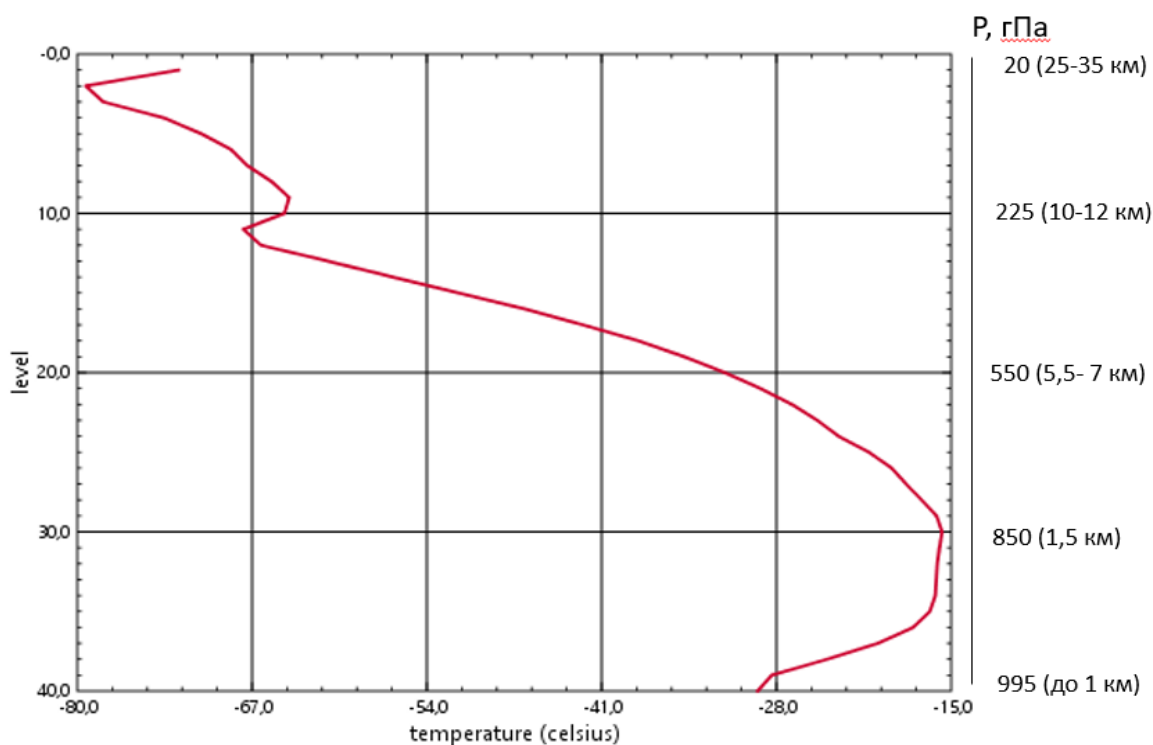


РИСУНОК 3.4 - ГРАФИК СМОДЕЛИРОВАННОГО ВЕРТИКАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА (С°) 19 ЯНВАРЯ 2010Г. В 00Ч (UTC)

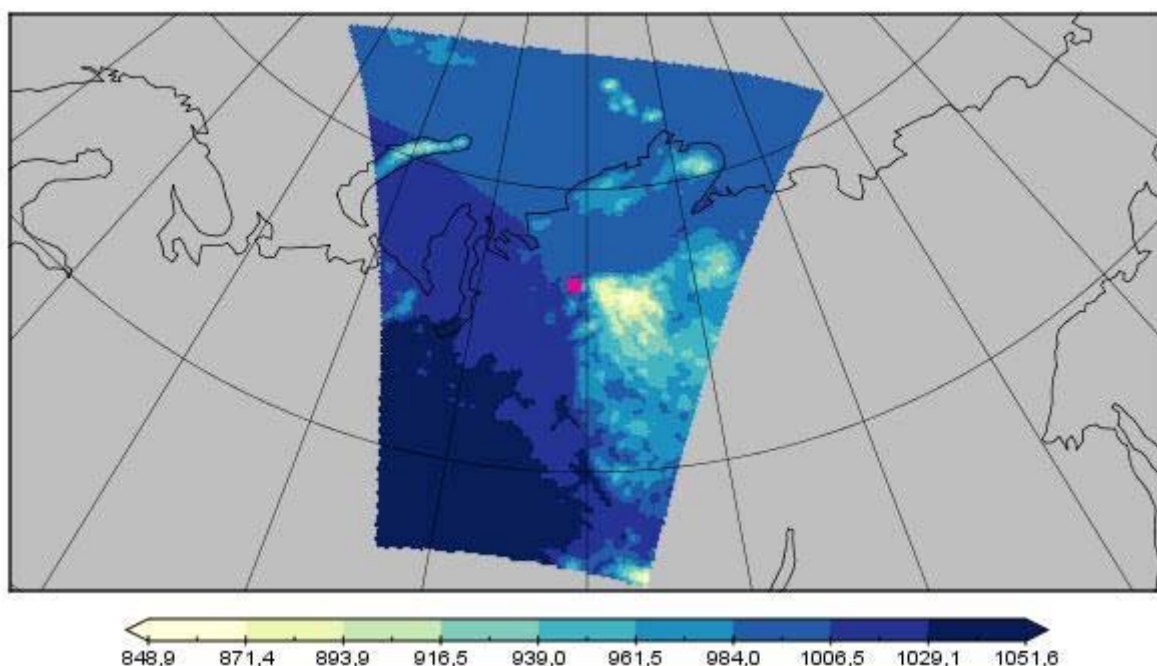


РИСУНОК 3.5 - ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ АТМОСФЕРНОГО ПРИЗЕМНОГО ДАВЛЕНИЯ (гПа) 19 января 2010 г. в 00ч (UTC) ПО РЕЗУЛЬТАТАМ МОДЕЛИРОВАНИЯ ENVIRO-HIRLAM

По рисунку 3.5 видно, что западнее Норильска находится область с низким давлением, что возможно связано с особенностями орографии, и находящимся территориально близко плато Путорано. С юго-востока моделируется область высокого давления, связанная с Сибирским антициклоном. Из рисунка 3.5, иллюстрирующего пространственное распределение температуры на высоте 2 метра от земли, что затак тепла происходит с северо-запада. За сутки поле атмосферного давления мало изменяется, поэтому рисунок 3.5 вполне иллюстрирует картину характерную для всего временного промежутка. По характеру пространственного распределения скорости и направления ветра видно, что к северу от Норильска двигаясь с запада проходит фронт, связанный возможно с циклональной циркуляцией в районе Карского моря.

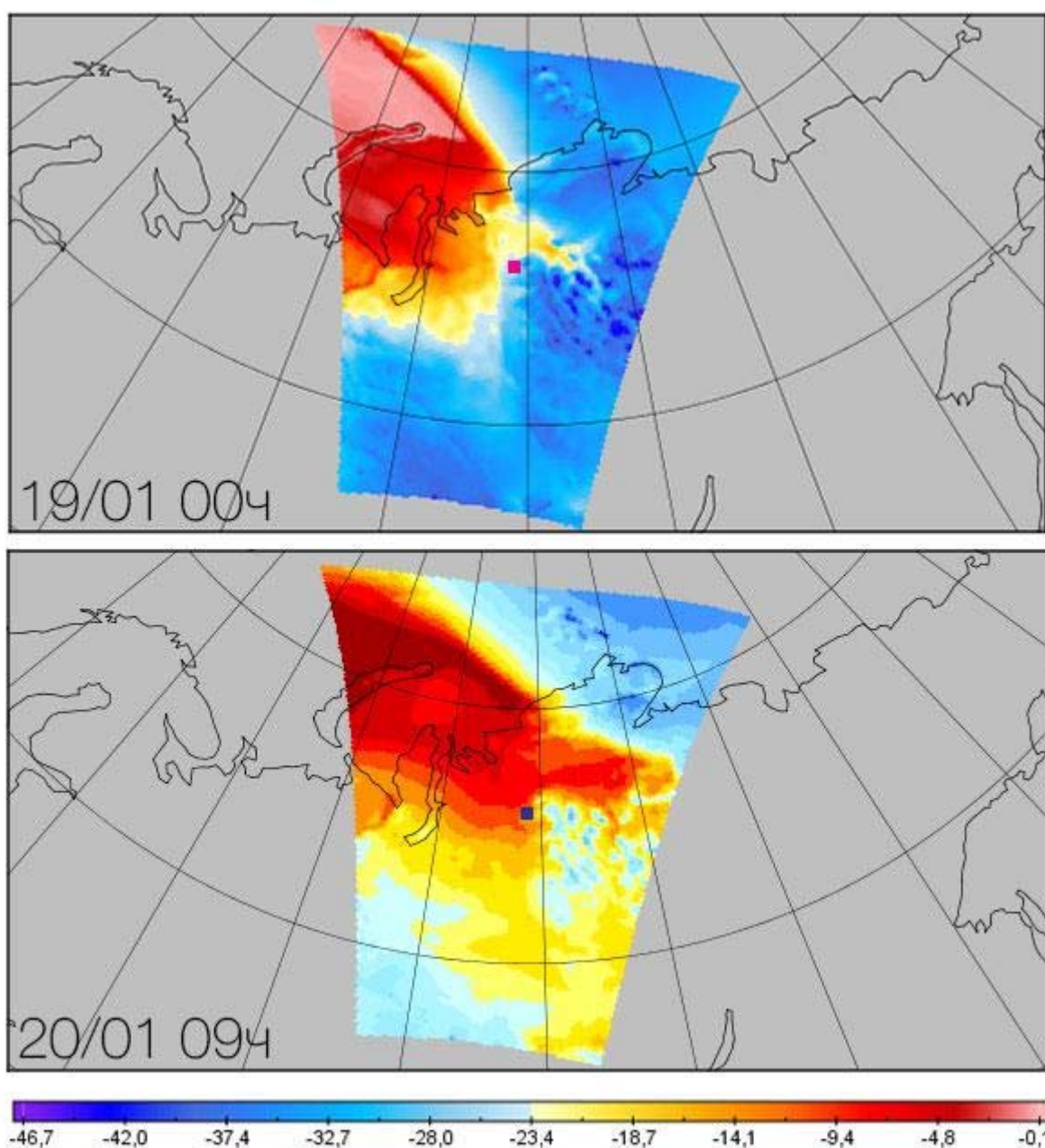


Рисунок 3.6 - Пространственное распределение температуры воздуха (С°)
НА УРОВНЕ 2 МЕТРА ОТ ЗЕМЛИ 19 И 20 ЯНВАРЯ 2010 Г. В 00ч И 09ч (UTC)
СООТВЕТСТВЕННО ПО РЕЗУЛЬТАТАМ МОДЕЛИРОВАНИЯ ENVIRO-HIRLAM

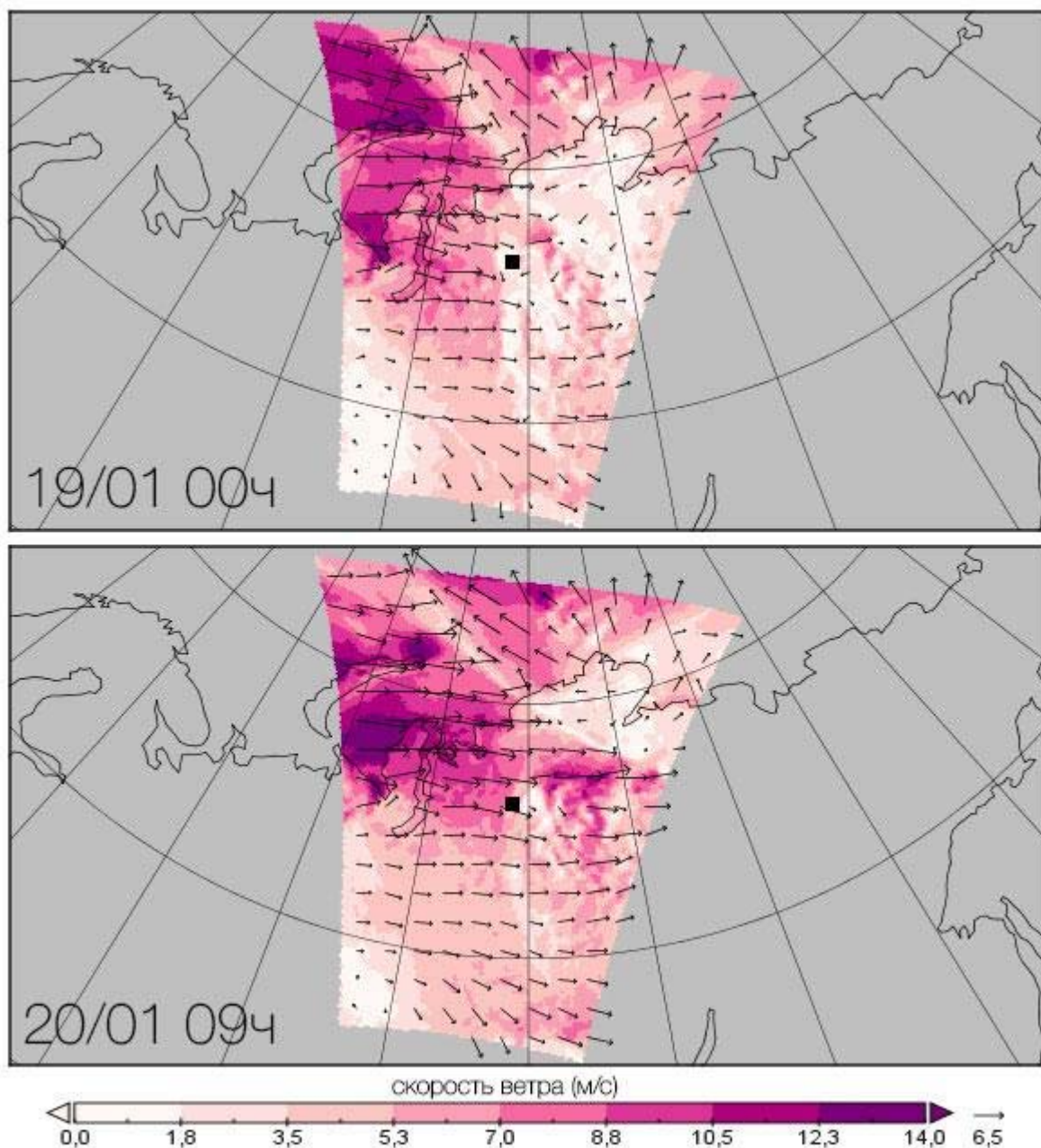


РИСУНОК 3.7 - ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ ВЕТРА (М/С) НА УРОВНЕ 10 МЕТРОВ ОТ ЗЕМЛИ 19 И 20 ЯНВАРЯ 2010 Г. В 00Ч И 09Ч (UTC) СООТВЕТСТВЕННО ПО РЕЗУЛЬТАТАМ МОДЕЛИРОВАНИЯ ENVIRO-HIRLAM

Результаты моделирования диоксида серы и сульфата в единицах измерения ppb_m — это массовое отношение смеси, выраженное в миллиардной доле вещества. Под сульфатами в данном случае подразумевается твердая аэрозоль в мелкодисперсной фракции, а именно в размере входящим в $\text{PM}_{2.5}$. Концентрации рассчитывались для модального уровня 40 соответствующему 995 гПа, то есть высоте до 1 км.

ПДК концентрации SO_2 в Российской Федерации составляет разово 0,5 мг/м³ и среднесуточно 0,05 мг/м³, что приблизительно составляет 190 ppbm и 19 ppbm соответственно. Концентрация SO_2 в указанные сутки в следе от источника в городе Норильск, в зависимости от расстояния от него, но в целом превышает ПДК в несколько раз. И так как концентрация SO_2 является предиктором к содержанию сульфата вполне ожидаемо сульфатный след повторяет очертание газового следа. Также можно заметить, что след растянулся в сторону преобладающего направления ветра в данном случае северо-западное и западное. На рисунке 3.6 сульфат в срок 19.01.2010 18ч высокие концентрации отмечаются также на юго-востоке области моделирования. На юго-востоке в модель были заданы источники загрязнения, соответствующие городам Красноярск, Омск, Томск, Кемерово, Новосибирск и Барнаул.

Остальные исследуемые загрязнители, а именно: мелкодисперсная пыль, органический и черный углерод, морская соль - имели концентрации близкие к 0 ppbm на исследуемой территории г. Норильск, поэтому их визуализация не включена в данный текст. Но отдельные облака черного углерода на всей территории моделирования, в которую входит и большая часть Красноярского края, содержание ВС не превышало 1,5 ppbm, что может быть связано с высотой расчетного уровня по данным аэрологического наблюдения на рассматриваемой территории в январе 2010 г. высота соответствующего атмосферного давления 950 гПа равна примерно 400-600 м. над земной поверхностью. Небольшие концентрации остальных загрязнителей можно связать с территорией (морская соль, пыль) и временем года (пыль и органический углерод).

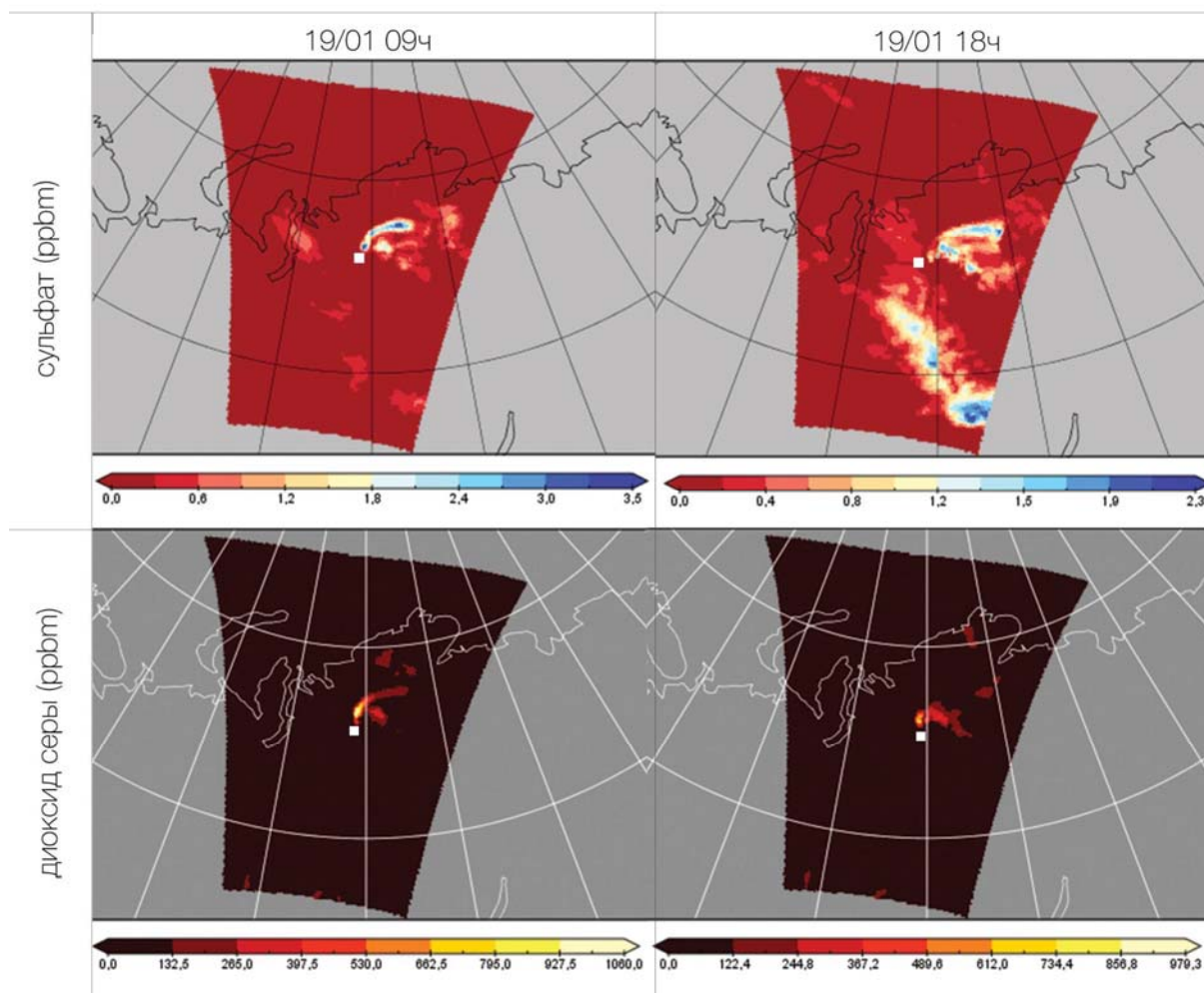


РИСУНОК 3.8 - РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ДИОКСИДА СЕРЫ И СУЛЬФАТА (PPBM) ПО РЕЗУЛЬТАТАМ МОДЕЛИРОВАНИЯ ENVIRO-HIRLAM 19 ЯНВАРЯ 2010 (ВРЕМЯ УКАЗАНО UTC)

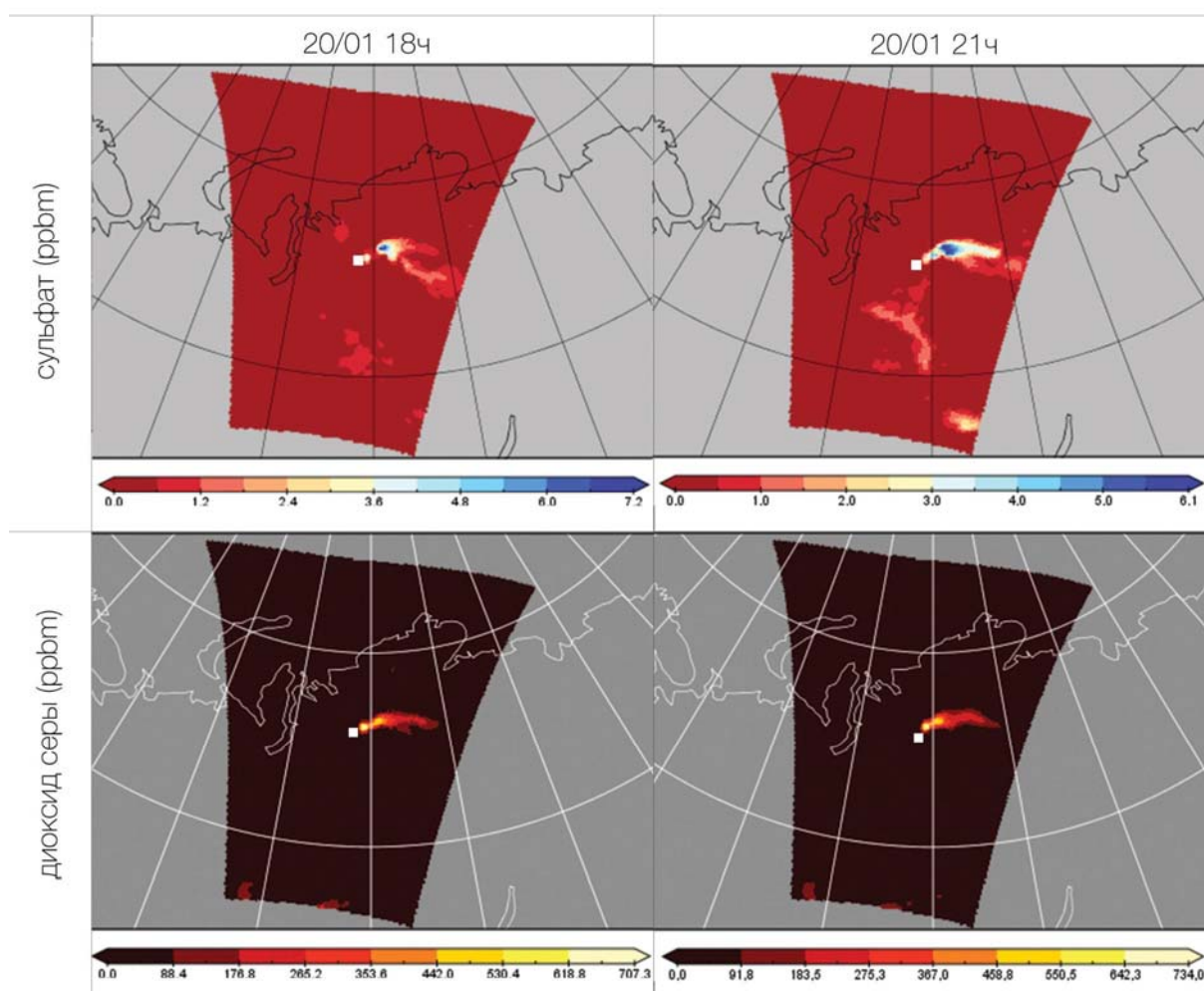


РИСУНОК 3.9 - РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ДИОКСИДА СЕРЫ И СУЛЬФАТА (PPBM) ПО РЕЗУЛЬТАТАМ МОДЕЛИРОВАНИЯ ENVIRO-HIRLAM 20 ЯНВАРЯ 2010 (ВРЕМЯ УКАЗАНО UTC)

3.2. Загрязнение воздуха при экстремально низкой температуре воздуха

Как видно из представленных ниже метеоданных, наблюдаемых в сутки с 28 по 29 января, последнее отличилось низкой температурой воздуха и слабой скоростью ветра. Так же как видно по построенному профилю отмечается сильная температурная инверсия, отраженная как в фактических данных, так и в результатах моделирования (рисунок 3.10 и 3.11). Однако нельзя не отметить, что максимумом температуры в инверсии в пограничном слое атмосферы в данных аэрологических наблюдений является значение -25°C , а в результатах моделирования -8°C . То есть Enviro-HIRLAM построила инверсию глубже чем было в действительности.

Таблица 3.3 - Обзор фактической погоды за срок с 28 по 29 января 2010 г (время указано местное). [90]

число	час	температура воздуха (С°)	атмосферное давление (гПа)	барическая тенденция	направление ветра	скорость ветра (м/с)	погода за прошедший срок
28	01	-31,2	994,4	3,1	зсз	2	Облака в целом рассеиваются
	04	-33,4	997,5	4,3	зсз	6	Умеренный поземок
	07	-35,7	1001,8	4,5	сз	7	Умеренный поземок
	10	-36,5	1006,3	4,5	зсз	7	Умеренный поземок
	13	-37,4	1010,8	4,8	зсз	7	Умеренный поземок
	16	-36,5	1015,6	3,7	зсз	6	Умеренный поземок
	19	-36,6	1019,4	3,2	зсз	5	Состояние неба не изменилось
	22	-36,5	1022,6	3,5	сз	8	слабый или умеренн

							ый поземок
29	04	-35,4	1026,0	2,5	сз	6	Умеренн ый поземок
	07	-37,6	1028,6	2,5	сз	4	Дымка.
	10	-41,5	1031,1	2,0	ссь	3	Туман с отложен ием измороз и
	13	-41,4	1033,1	2,5	ссь	2	Туман с отложен ием измороз и
	16	-42,0	1035,6	2,4	штиль	0	Туман с отложен ием измороз и
	19	-43,0	1038,0	1,6	штиль	0	Дымка.
	22	-45,4	1039,6	2,4	юв	2	Дымка.

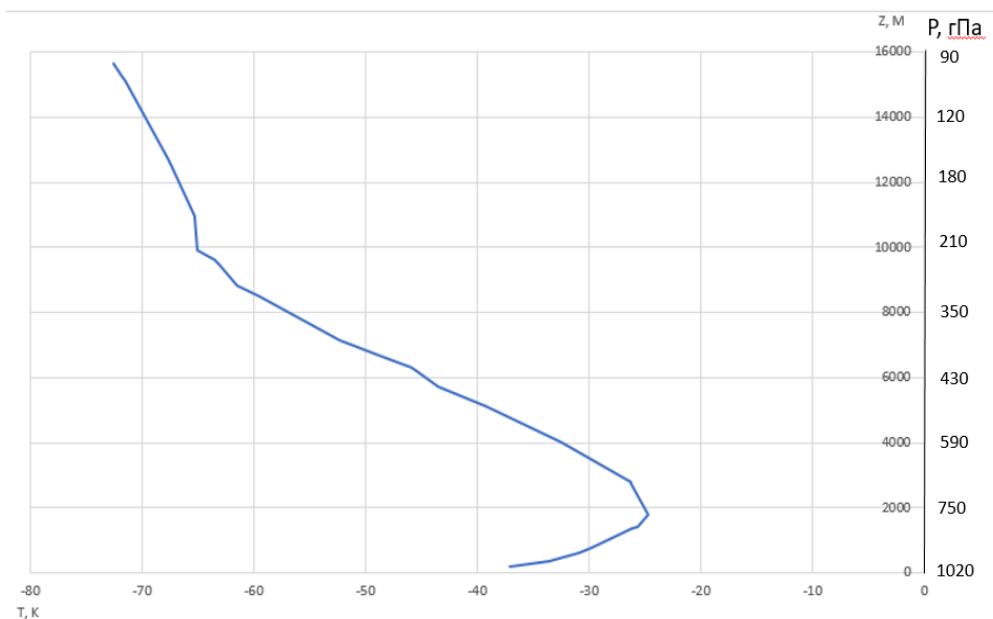


РИСУНОК 3.10 - ГРАФИК ФАКТИЧЕСКОГО ВЕРТИКАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА (С°) 29 янвАРЯ 2010г. в 00ч (UTC)

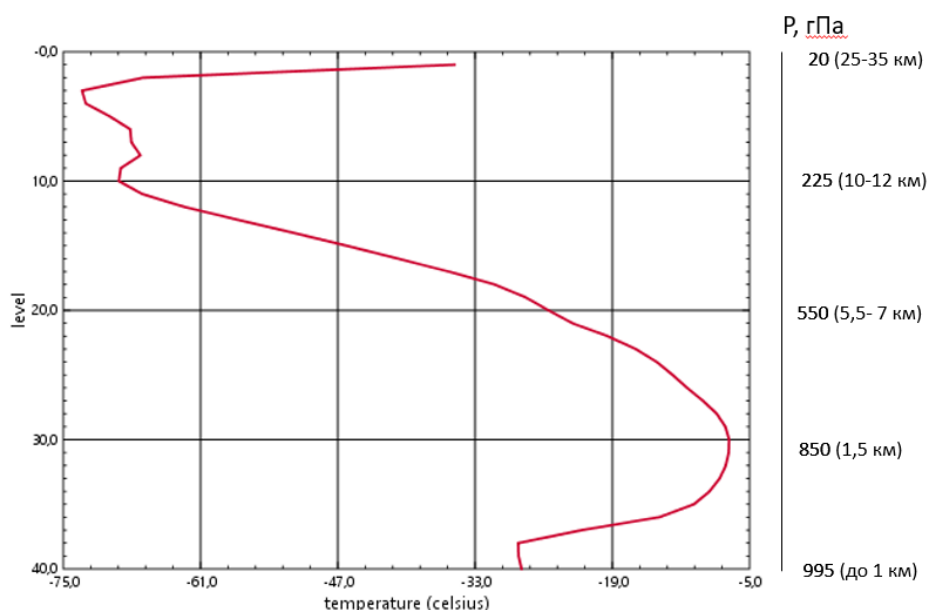


РИСУНОК 3.11 - ГРАФИК СМОДЕЛИРОВАННОГО ВЕРТИКАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА (С°) 29 янвАРЯ 2010г. в 00ч (UTC)

Согласно рисунку 3.12, иллюстрирующему поле приземного атмосферного давления, Норильск находится в области повышенного давления, но область повышенного давления отмечается рядом с городом в том же месте, как и на рисунке 3.5. Что говорит об антициклональной циркуляции атмосферы. На рисунке 3.13 можно отметить также заток тепла с северо-запада, но в данном случае он проходит южнее Норильска, более того

в течении данных суток он все более отдаляется от города. Рисунок 3.14 в свою очередь демонстрирует небольшие скорости ветра в окрестностях Норильска, что подтверждает антициклональную циркуляцию, а также показывает, что результаты моделирования по ветру соответствуют данным наблюдения.

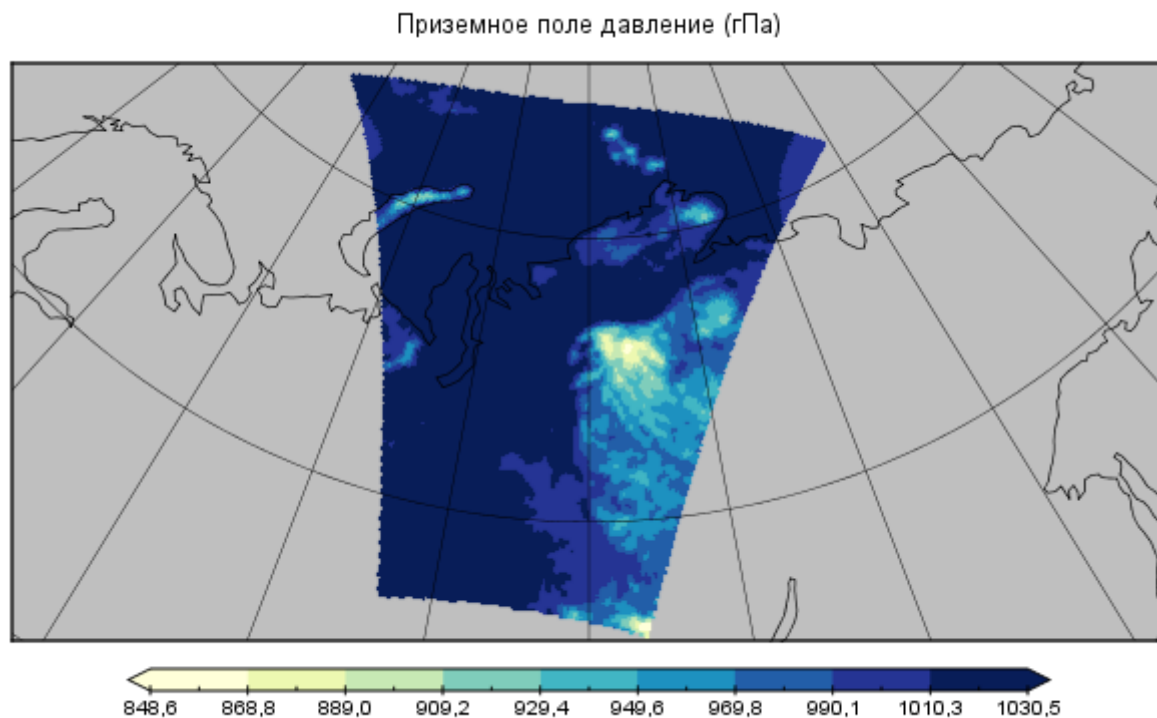


РИСУНОК 3.12 - ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ АТМОСФЕРНОГО ПРИЗЕМНОГО ДАВЛЕНИЯ (гПа) 29 ЯНВАРЯ 2010 Г. В 00Ч (UTC) ПО РЕЗУЛЬТАТАМ МОДЕЛИРОВАНИЯ ENVIRO-HIRLAM

Содержание сульфата (рисунок 3.15 и 3.16) в городе Норильск в период с 28 по 29 января близко к нулю, однако диоксид серы в данной ситуации показывает концентрацию, превышающую в 10 раз нормы ПДК, установленную в РФ. Это примечательно, ведь диоксид серы является важным фактором для образования сульфата. И задерживающий слой температурной инверсии у земли должен способствовать накоплению аэрозоля. Однако значения характерные для этого процесса имеет лишь диоксид серы. Это можно объяснить химическими процессами образования сульфата в атмосфере, которые, вероятно, при таких низких температурах замедляются или совсем не проходят. Также интересно заметить, что ненулевая концентрация сульфатом наблюдается в пределах потока тепла, что тем самым

подтверждает то что низкое содержание этого вещества напрямую связано с температурой.

Черный и органический углерод, пыль и морская соль на рассматриваемом промежутке времени также имеют концентрации близкие к нулю.

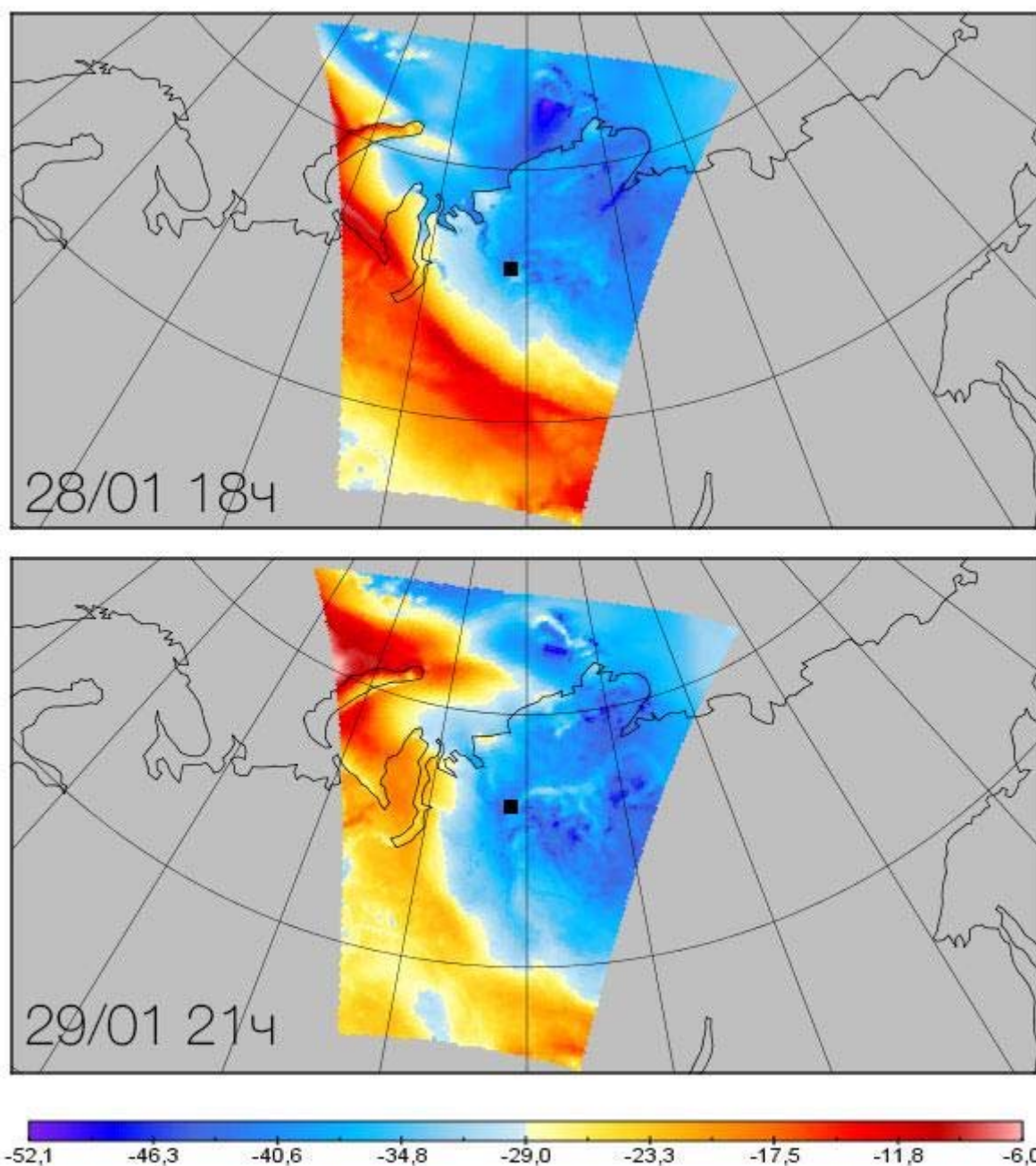


РИСУНОК 3.13 - ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА (С°) НА УРОВНЕ 2 МЕТРА ОТ ЗЕМЛИ 28 И 29 ЯНВАРЯ 2010 Г. В 18ч И 21 ч (UTC) СООТВЕТСТВЕННО ПО РЕЗУЛЬТАТАМ МОДЕЛИРОВАНИЯ ENVIRO-HIRLAM

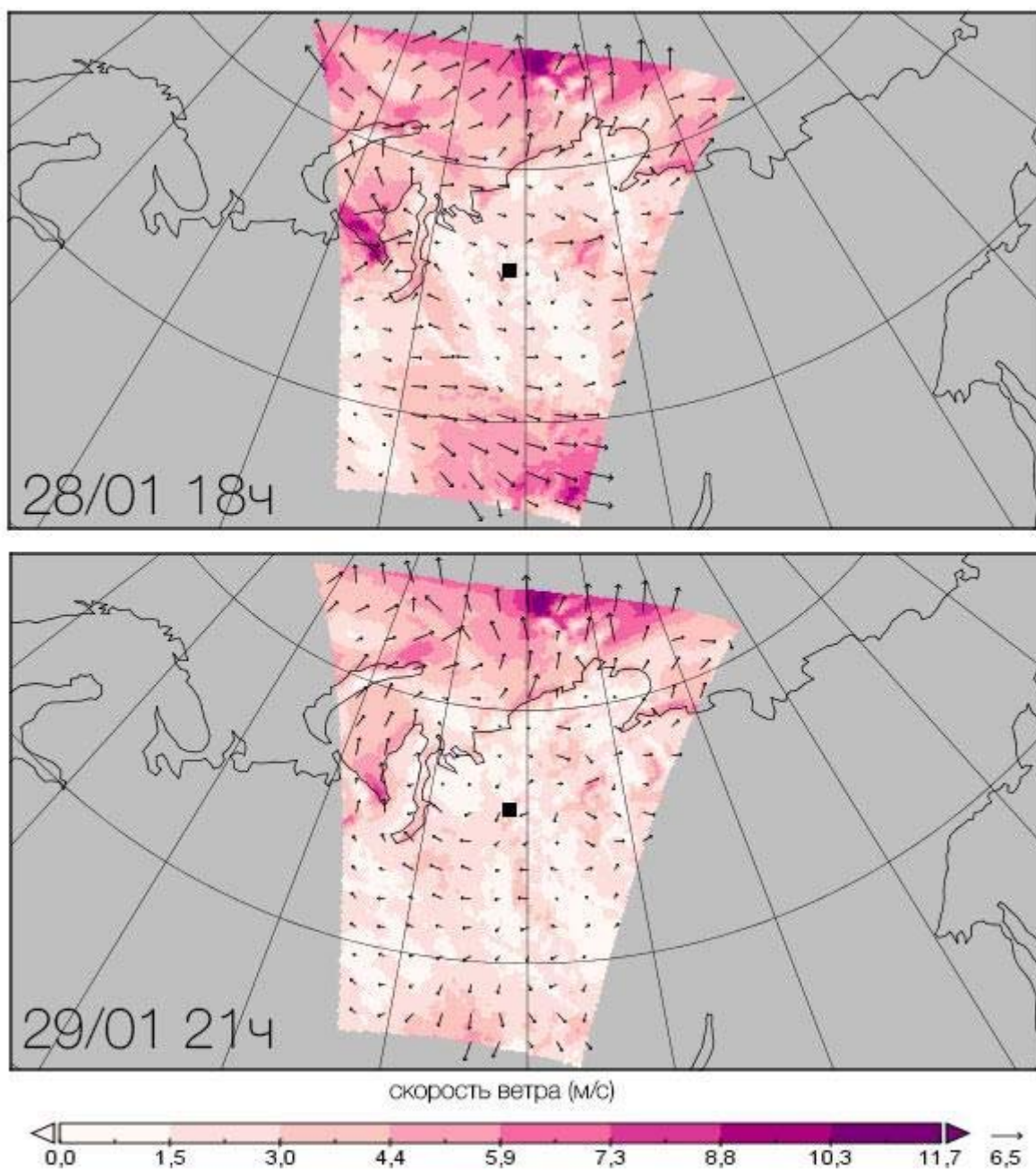


Рисунок 3.14- Пространственное распределение скорости ветра (м/с) на уровне 10 метров от земли 28 и 29 января 2010 г. в 18ч и 21ч соответственно по результатам моделирования ENVIRO-HIRLAM

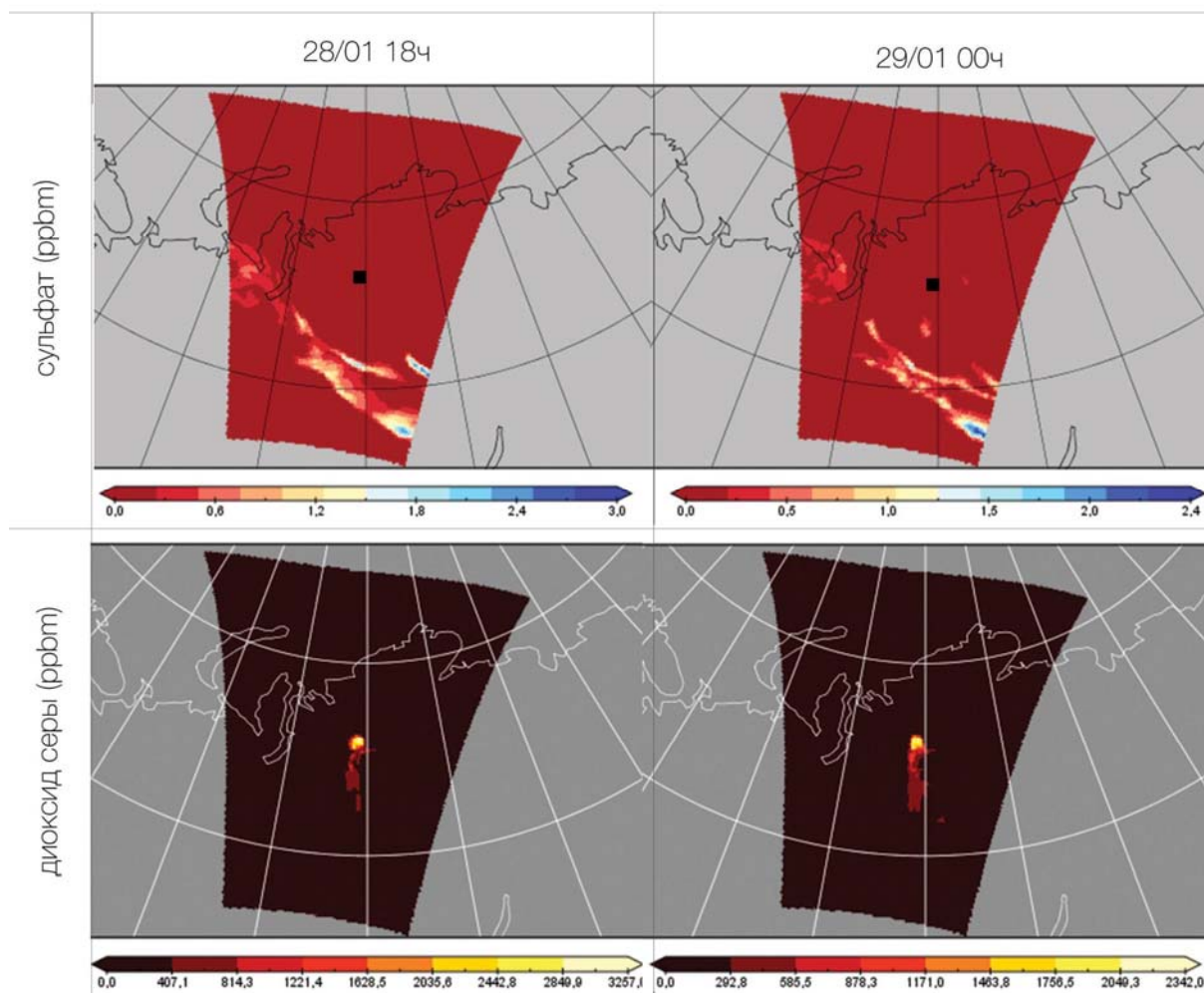


РИСУНОК 3.15- РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ДИОКСИДА СЕРЫ И СУЛЬФАТА (PPBM) ПО РЕЗУЛЬТАТАМ МОДЕЛИРОВАНИЯ ENVIRO-HIRLAM 28 И 29 ЯНВАРЯ 2010 (ВРЕМЯ УКАЗАНО UTC)

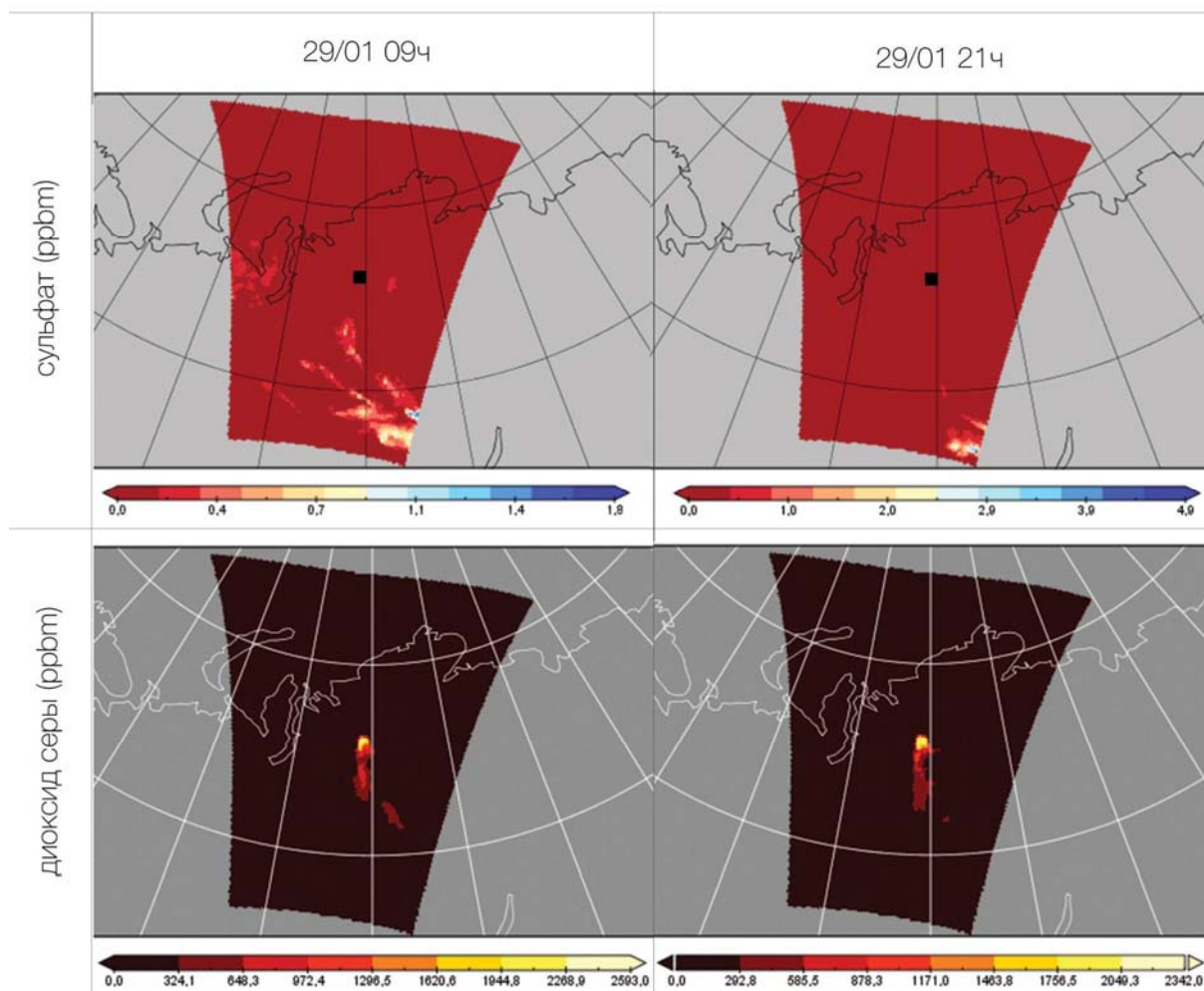


РИСУНОК 3.16 - РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ДИОКСИДА СЕРЫ И СУЛЬФАТА (PPBM) ПО РЕЗУЛЬТАТАМ МОДЕЛИРОВАНИЯ ENVIRO-HIRLAM 29 ЯНВАРЯ 2010 (ВРЕМЯ УКАЗАНО UTC)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе работы были выполнены все поставленные задачи. При сопоставлении результатов моделирования температуры воздуха по высоте и данных аэрологических наблюдений, было выяснено: что при низких температурах, в данном случае имеется в виду меньше $-30\text{ (C}^\circ\text{)}$, модель Enviro-HIRLAM прогнозирует значительно менее приближенную к действительности приземную инверсию, нежели при температурах близких к среднегодовым январских, характерных для исследуемой территории.

Исследуя загрязняющие вещества в городском воздухе Норильска, были сделаны такие выводы: приземная инверсия при экстремально низких температурах способствует накоплению диоксида серы, однако это неверно для сульфатов, концентрация которых в указанных условиях близка к нулю. Данный факт может указывать на особенности химии атмосферы в обстоятельствах низких температур, а именно замедление или отсутствие реакций с участием SO_2 и NO_2 в городском воздухе, продуктом, которых как раз является сульфат фракции $\text{PM}_{2.5}$. В то время как при температурах близких к январским среднегодовым (-24 C°) отмечается прямая зависимость содержания сульфата и диоксида серы.

Другие исследуемые загрязнители такие как мелкодисперсная пыль, органический и черный углерод, морская соль - имели концентрации близкие к 0 ppbm на исследуемой территории г.Норильск на всем исследуемом промежутке времени, поэтому закономерности связанных с температурой воздуха не было выявлено. Но отдельные облака, содержащие черный углерод, на всей территории моделирования, в которую входит и большая часть Красноярского края, имели концентрацию не более $1,5\text{ ppbm}$, что может быть связано с высотой расчетного уровня примерно примерно $400\text{-}600\text{ м.}$ над земной поверхностью. Небольшие концентрации остальных загрязнителей

можно связать с удаленностью природных источников (морская соль) и временем года (пыль и органический углерод).

Также важно отметить, что в Норильске в исследуемые даты прогнозировалась концентрация SO_2 превышающая ПДК более чем в 5 раз. Из чего можно сделать вывод, об актуальности проблемы загрязнения воздуха в Норильске, особенно интересна для дальнейшего исследования тема «поведения» загрязняющих компонентов при экстремально низких температурах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Wang J, Wu Q, Liu J, Yang H, Yin M, Chen S, et al. (2019). «Vehicle emission and atmospheric pollution in China: problems, progress, and prospects». <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6526014/>
2. Air Quality Expert Group, Department for Environment, Food and Rural Affairs. (2004). Nitrogen Dioxide in the United Kingdom. https://uk-air.defra.gov.uk/library/assets/documents/reports/aqeg/nitrogen_dioxide_in_the_UK-summary.pdf
3. Aggarwal P, Jain S (2015). «Impact of air pollutants from surface transport sources on human health: A modeling and epidemiological approach». <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S016041201500152X?via%3Dihub>
4. EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook (2019) «Construction and demolition»
5. Christine Wiedinmyer, Robert J. Yokelson and Brian K. Gullett (2014). «Global Emissions of Trace Gases, Particulate Matter, and Hazardous Air Pollutants from Open Burning of Domestic Waste». <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/es502250z>
6. California Air Resources Board (2022). «Combustion Pollutants in Your Home - Guidelines».
7. Science of The Total Environment (2018). «Prescribed fire and its impacts on ecosystem services in the UK». <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.12.161>
8. R. Harper, Stefan H. Doerr, Cristina Santin, Cynthia A. Froyd, Paul Sinnadurai (2018). «Prescribed fire and its impacts on ecosystem services in the UK». <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.12.161>
9. Maya Almaraz, Edith Bai, Chao Wang, Justin Trousdell, Stephen Conle, Ian Faloon and Benjamin Z. Houlton (2018). «Agriculture is a major source of

- NO_x pollution in California». <https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.aao3477>
10. https://www.apis.ac.uk/overview/pollutants/overview_o3.htm
 11. Na Zhao, Gang Wang, Guohao Li, Jianlei Lang (2013-2019). Trends in Air Pollutant Concentrations and the Impact of Meteorology in Shandong Province, Coastal China.
 12. «Education Data, Visualizations & Graphics on particulate pollution» (2019). www.cleanairresources.com
 13. Fischetti M (2014). «Trees That Pollute». Scientific American. 310 (6): 14. Bibcode:2014SciAm.310f..14F. doi:10.1038/scientificamerican0614-14.
 14. Goldstein AH, Koven CD, Heald CL, Fung IY (2009). «Biogenic carbon and anthropogenic pollutants combine to form a cooling haze over the southeastern United States». Proceedings of the National Academy of Sciences. 106 (22): 8835–40. Bibcode:2009PNAS..106.8835G.
 15. <https://www.iqair.com/ru/newsroom/air-pollution-mt-etna-mt-kilauea-eruptions>
 16. <https://www.usgs.gov/programs/VHP/volcanoes-can-affect-climate>
 17. The Atmospheric Sulphur Cycle and the role of Volcanic SO₂ David S. Stevenson ¹, Colin E. Johnson ², William J. Collins ², and Richard G. Derwent ² ¹Institute for Meteorology, University of Edinburgh, King's Buildings, Edinburgh, EH9 3JZ, UK. ²Climate Research, Meteorological Office, London Road, Bracknell, RG12, 2SZ, UK
 18. Nguyen Nhat Ha Chi, Nguyen Thi Kim Oanh. Photochemical smog modeling of PM_{2.5} for assessment of associated health impacts in crowded urban area of Southeast Asia. (2021). <https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.101241>
 19. C. K. Chan and X. Yao (2008). «Air pollution in mega cities in China,” Atmospheric Environment, vol. 42, no. 1, pp. 1–42,
 20. D. L. Yue, M. Hu, Z. J. Wu et al. , (2010). «Variation of particle number size distributions and chemical compositions at the urban and downwind regional

- sites in the Pearl River Delta during summertime pollution episodes,” *Atmospheric Chemistry and Physics*, vol. 10, no. 19, pp. 9431–9439.
21. Доклад Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, ФГБУ «Среднесибирское УГМС» и Территориальной центра по мониторингу загрязнения окружающей среды - «Состояние загрязнения окружающей среды на территории Красноярского края за 3 кв 2017 г.»
22. Б. А. Ревич, Т. Л. Харькова (2023). Качество атмосферного воздуха и здоровье жителей Норильска: динамика ситуации за 20 лет. <https://doi.org/10.32686/1812-5220-2023-20-1-14-25>
23. Samoli E et al (2008). Acute effects of ambient particulate matter on mortality in Europe and North America: results from the APHENA Study. *Environmental Health Perspectives*.
24. Beelen R et al (2008). Long-term effects of traffic-related air pollution on mortality in a Dutch cohort (NLCS-AIR Study). *Environmental Health Perspectives*, 116(2):196–202.
25. Krewski D et al (2009). Extended follow-up and spatial analysis of the American Cancer Society linking particulate air pollution and mortality. Boston, MA, Health Effects Institute (HEI Research Report 140).
26. Pope CA III et al. Lung cancer, cardiopulmonary mortality, and long-term exposure to fine particulate air pollution. *Journal of the American Medical Association*, 2002, 287(9): 1132–1141.
27. Z. Zhang, X. Zhang, D. Gong et al. , (2015). «Evolution of surface O₃ and PM_{2.5} concentrations and their relationships with meteorological conditions over the last decade in Beijing,” *Atmospheric Environment*, vol. 108, pp. 67–75.
28. X. Yang, S. Wang, W. Zhang, D. Zhan, and J. Li (2017). «The impact of anthropogenic emissions and meteorological conditions on the spatial

- variation of ambient SO₂ concentrations: a panel study of 113 Chinese cities,” *Science of the Total Environment*, vol. 584-585, pp. 318–328.
29. Jianjun Wang, Meigen Zhang, Xiaolin Bai, Hongjian Tan, Sabrina Li, Jiping Liu, Rui Zhang, Mark A. Wolters, Xiuyuan Qin, Miming Zhang, Hongmei Lin, Yuenan Li, Jonathan Li & Liqi Chen. Large-scale transport of PM_{2.5} in the lower troposphere during winter cold surges in China.
 30. Goody R. M., Walshaw C. D. (1953). The origin of atmospheric nitrous oxide, *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, 79, 496
 31. Faith W. L., Renzetti N. A., Rogers L. A. W. (1959). Air Pollution Foundation (Los Angeles) 5th Tech. Progr. Rep., No. 27
 32. B. Degraeuwe, P. Thunis, A. Clappier, M. Weiss, W. Lefebvre, S. Janssen, S. Vranckx. (2017). Impact of Passenger Car NO_x Emissions on Urban NO₂ Pollution — Scenario Analysis for 8 European Cities Atmospheric Environment.
 33. J. Casquero-Vera, H. Lyamani, G. Titos, E. Borrás, F. Olmo, L. Alados-Arboledas (2019). Impact of primary NO₂ emissions at different urban sites exceeding the European NO₂ standard limit. *Sci. Total Environ.*, 646
 34. David C. Carslaw^a, Naomi J. Farrena, Adam R. Vaughana, William S. Drysdale^a, Stuart Young^a, James D. Lee^a. The diminishing importance of nitrogen dioxide emissions from road vehicle exhaust
 35. Reiter R. H., Reiter M. (1958). Relations between the contents of nitrate and nitrate ions in precipitations and simultaneous atmospheric electric processes, *Recent Advances in Atmospheric Electricity*, Ed. L. G. Smith, Pergamon Press, New York
 36. Georgii H. W. (1960). Untersuchungen über atmosphärische Spurenstoffe und ihre Bedeutung für die Chemie der Niederschläge, *Geofis. pura e appl.*, 47, 155
 37. Reynolds W. C., Notes on London and suburban air, *J. Soc. Chem Ind.* (London)

- 38.Reiter R. H., Reiter M. (1958). Relations between the contents of nitrate and nitrate ions in precipitations and simultaneous atmospheric electric processes, Recent Advances in Atmospheric Electricity, Ed. L. G. Smith, Pergamon Press, New York
- 39.Georgii H. W. (1960). Untersuchungen über atmosphärische Spurenstoffe und ihre Bedeutung für die Chemie der Niederschläge, Geofis. pura e appl., 47, 155
- 40.B. Degraeuwe, P. Thunis, A. Clappier, M. Weiss, W. Lefebvre, S. Janssen, S. Vranckx (2017). Impact of Passenger Car NO_x Emissions on Urban NO₂ Pollution — Scenario Analysis for 8 European Cities Atmospheric Environment.
- 41.J. Casquero-Vera, H. Lyamani, G. Titos, E. Borrás, F. Olmo, L. Alados-Arboledas (2019). Impact of primary NO₂ emissions at different urban sites exceeding the European NO₂ standard limit. Sci. Total Environ., 646
- 42.The diminishing importance of nitrogen dioxide emissions from road vehicle exhaust. David C.Carlawab, Naomi J.Farrena, Adam R.Vaughana, William S.Drysdalea Stuart Younga, James D.Leea
- 43.Twomey, S., (1954). The composition of hygroscopic particles in the atmosphere. J. Meleo
- 44.Air quality guidelines: global update 2005. Particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide. Copenhagen, WHO Regional Office for Europe, 2006.
- 45.Beelen R et al (2008). Long-term effects of traffic-related air pollution on mortality in a Dutch cohort (NLCS-AIR Study). Environmental Health Perspectives, 116(2):196–202.
- 46.Magill P. L., Holden F. R., Ackley C. (Ed.), Air Pollution Hand- book, McGraw-Hill, New York, 1956, p. 2.

47. Junge C. E., Werby R. T., The concentration of chloride, sodium, potassium, calcium and sulfate in rain water over the United State, *J. Meteorol.*, 15, 417 (1958)
48. Junge C. E., Sulfur in the atmosphere, *J. Geophys. Research*, 65, 227 (1960)
49. Gerhard E. R., Johnstone H. F., Photochemical oxidation of sulfur dioxide in air, *Ind. Eng. Chem.*, 47, 972 (1955)
50. Cauer H (1951). Some problems of atmospheric chemistry
51. Urone P., Schroeder W. H., Miller S. R., Reactions of sulfur dioxide in air, in «Proc. 2nd IUAPPA Clean Air Congress, Washington, D. C., December 1970»
52. Haagen-Smit, A.J., Chemistry and physiology of Los Angeles smog, *Indust. Eng. Chem.*, 44, 1 342- 1 346, 1952.
53. Trainer, M., E.T. Williams, D.D. Parrish, M.P. Buhr, E.J. Allwine, H.H. Westberg, F. C. Fehsenfeld, and S .C. Liu, Models and observations of the impact of natural hydrocarbons in rural ozone, *Nature*, 329, 705-707, 1987.
54. Chameides, W.L., R.W. Lindsay, J. Richardson, and C.S. Kiang, The role of biogenic hydrocarbons in urban photochemical smog: Atlanta as a case study, *Science*, 241, 1473-1 475, 1988.
55. Khalil MAK, Rasmussen RA. The global cycle of carbon monoxide: trends and mass balance. *Chemosphere*. 1990;20:227–42.
56. Bartholomew GW, Alexander M. Soil as a sink for atmospheric carbon monoxide. *Science*. 1981;212:1389–91.
57. Drummond, James (February 2, 2018). «MOPITT, Atmospheric Pollution, and Me: A Personal Story». Canadian Meteorological and Oceanographic Society. Retrieved August 1, 2018.
58. Pommier, M.; Law, K. S.; Clerbaux, C.; Turquety, S.; Hurtmans, D.; Hadji-Lazaro, J.; Coheur, P.-F.; Schlager, H.; Ancellet, G.; Paris, J.-D.; Nédélec, P.; Diskin, G. S.; Podolske, J. R.; Holloway, J. S.; Bernath, P. (2010). «IASI

- carbon monoxide validation over the Arctic during POLARCAT spring and summer campaigns»
- 59.Короткова Н. В., Семенова Н. В. Пространственно-временное изменение уровня загрязнения атмосферы в Саратове // География и регион : материалы междунар. науч.практ. конф. Пермь : Пермский государственный национальный исследовательский университет, 2015. С. 84–90
 - 60.Короткова Н. В., Семенова Н. В. Метеорологический потенциал самоочищения атмосферы в Саратове // География в Саратовском университете. Современные исследования : сб. науч. тр. / под ред. А. Н. Чумаченко. Саратов : Издательство Саратовского университета, 2014. С. 194–201.
 - 61.М.А.Лощенко, Н.Ф. Еланский, А.В. Трифанова. Влияние метеозагрязнителей на загрязнение воздуха в Москве. Вестник Российской академии наук 2014/1
 - 62.Безуглая Э.Ю. Метеорологический потенциал и климатические особенности загрязнения воздуха городов. Л.: Гидрометеопиздат, 1980.
 - 63.Климатические характеристики условий распространения примесей в атмосфере / Под редакцией Э.Ю. Безуглой и М.Е.Берлянда. Л.: Гидрометеопиздат, 1983.
 - 64.Короткова Н. В., Семенова Н. В. Влияние метеорологических условий на загрязнение атмосферного воздуха в Саратове // Изв. Сарат. ун-та. Нов. сер. Сер. Науки о Земле. 2019. Т. 19, вып. 3. С. 168–173. DOI: <https://doi.org/10.18500/1819-7663-2019-19-3-168-173>
 - 65.Karagulian F., Van Dingenen R., Belis C.A., Janssens-Maenhout G., Crippa M., Guizzardi D., Dentener F., Attribution of anthropogenic PM_{2.5} to emission sources, EUR 28510 EN

66. Sulfate, nitrate and chloride in PM_{10} in the city of San José, Costa Rica: 2004–2006. J. Herrere Murillo, J. F. Rojas Marin S. Rodriguez Roman R. Garcia Martinez. *Atmósfera* vol.23 no.1 Ciudad de México ene. 2010
67. Junge C.E. Ryan T. G. Study of the SO_2 oxidation in solution and its role in atmospheric chemistry
68. BOP report The contribution of sea salt to PM_{10} and $PM_{2.5}$ in the Netherlands A.M.M. Manders, TNO; M. Schaap, TNO; M. Jozwicka, TNO; F. van Arkel, RIVM; E.P. Weijers, ECN; J. Matthijsen, PBL
69. L. Xu, S. Batterman, F. Chen et al., «Spatiotemporal characteristics of $PM_{2.5}$ and PM_{10} at urban and corresponding background sites in 23 cities in China,” *Science of the Total Environment*, vol. 599-600, pp. 2074–2084, 2017.
70. W. E. Wilson and H. H. Suh, «Fine particles and coarse particles: concentration relationships relevant to epidemiologic studies,” *Journal of the Air and Waste Management Association*, vol. 47, no. 12, pp. 1238–1249, 2012
71. S. Munir, T. M. Habeebullah, A. M. F. Mohammed, E. A. Morsy, M. Rehan, and K. Ali, «Analysing $PM_{2.5}$ and its association with PM_{10} and meteorology in the arid climate of Makkah, Saudi Arabia,” *Aerosol and Air Quality Research*, vol. 17, no. 2, pp. 453–464, 2017.
72. J. Hu, Y. Wang, Q. Ying, and H. Zhang, «Spatial and temporal variability of $PM_{2.5}$ and PM_{10} over the north China plain and the Yangtze River Delta, China,” *Atmospheric Environment*, vol. 95, pp. 598–609, 2014.
73. C. K. Chan and X. Yao, «Air pollution in mega cities in China,” *Atmospheric Environment*, vol. 42, no. 1, pp. 1–42, 2008
74. D. L. Yue, M. Hu, Z. J. Wu et al., «Variation of particle number size distributions and chemical compositions at the urban and downwind regional sites in the Pearl River Delta during summertime pollution episodes,” *Atmospheric Chemistry and Physics*, vol. 10, no. 19, pp. 9431–9439, 2010.

75. Chemical Composition and Source Apportionment of PM_{2.5} in a Border City in Southwest China Jianwu Shi, Chenyang Zhao, Zhijun Wang, Xiaochen Pang, Yaoqian Zhong, Xinyu Han and Ping Ning. (2021)
76. Sulphates, Nitrates, and chlorides in particle fractions of different size. Mirjana Cackovic, Vladimer Vajic and Kresemir Shegv. EGA Institute for Medical Research and Occupational Health, Zagreb, Croatia Received November 1999
77. Karagulian F., Van Dingenen R., Belis C.A., Janssens-Maenhout G., Crippa M., Guizzardi D., Dentener F., Attribution of anthropogenic PM_{2.5} to emission sources, EUR 28510 EN
78. J. Herrere Murillo, J. F. Rojas Marin S. Rodriguez Roman R. Garcia Martinez. Sulfate, nitrate and chloride in PM₁₀ in the city of San José, Costa Rica: 2004–2006. *Atmósfera* vol.23 no.1 Ciudad de México ene. 2010
79. J. Herrere Murillo, J. F. Rojas Marin S. Rodriguez Roman R. Garcia Martinez. Sulfate, nitrate and chloride in PM₁₀ in the city of San José, Costa Rica: 2004–2006. *Atmósfera* vol.23 no.1 Ciudad de México ene. 2010
80. Jianwu Shi, Chenyang Zhao, Zhijun Wang, Xiaochen Pang, Yaoqian Zhong, Xinyu Han and Ping Ning. Chemical Composition and Source Apportionment of PM_{2.5} in a Border City in Southwest China. (2021)
81. Mirjana Cackovic, Vladimer Vajic and Kresemir Shegv. Sulphates, Nitrates, and chlorides in particle fractions of different size. EGA Institute for Medical Research and Occupational Health, Zagreb, Croatia Received November 1999
82. Snider, G.; Weagle, C.L.; Murdymootoo, K.K.; Ring, A.; Ritchie, Y.; Stone, E.; Walsh, A.; Akoshile, C.; Anh, N.X.; Balasubramanian, R.; et al. Variation in global chemical composition of PM_{2.5}: Emerging results from SPARTAN. *Atmos. Chem. Phys.* 2016, 16, 9629–9653.
83. ВОЗ (2005). Рекомендации ВОЗ по качеству воздуха в отношении твердых частиц, озона, диоксида азота и диоксида серы – Глобальное обновление 2005 г.

- 84.<https://ges.rgo.ru/jour/article/view/1047>
- 85.Zhu, J.J.; Chen, Y.C.; Shie, R.H.; Liu, Z.S.; Hsu, C.Y. Predicting carbonaceous aerosols and identifying their source contribution with advanced approaches. *Chemosphere* 2021
- 86.«Seasonal variation, source, and regional representativeness of the background aerosol from two remote sites in western China». *Environmental Monitoring and Assessment* 167(1-4):265-88; July 2009.
- 87.Jacobson, M.Z. Strong radiative heating due to the mixing state of black carbon in atmospheric aerosols. *Nature* 2001, 409, 695–697.
- 88.Turpin, B.J.; Huntzicker, J.J. Identification of secondary organic aerosol episodes and quantitation of primary and secondary organic aerosol concentrations during SCAQS. *Atmos. Environ.* 1995, 29, 3527–3544.
- 89.<https://ru.weatherspark.com/y/>
- 90.<https://rp5.ru/>
- 91.<http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>
- 92.Май И.В., Клейн С.В., Вековщина С.А., Балашов С.Ю., Четверкина К.В., Цинкер М.Ю. Риск здоровью населения г. Норильска при воздействии веществ, загрязняющих атмосферный воздух. *Гигиена и санитария*. 2021; 100 (5): 528-534. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2021-100-5-528-53>
- 93.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.
- 94.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.