



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра метеорологических прогнозов

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(бакалаврская работа)

На тему: «Изменчивость приземного аэрозоля в г. Санкт-Петербург при
снижении антропогенной нагрузки весной 2020 года»

Исполнитель Олешко Алина Васильевна
(фамилия, имя, отчество)

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

Ермакова Татьяна Сергеевна
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»
заведующий кафедрой

(подпись)

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

Анискина Ольга Георгиевна
(фамилия, имя, отчество)

« 26 » мая 2022 г.

Санкт-Петербург
2022

Содержание

ВВЕДЕНИЕ	3
1. Основные сведения	5
1.1 Аэрозольные частицы и их роль в атмосфере.....	5
1.2 Снижение антропогенной нагрузки весной 2020 года.....	13
1.3 Характеристика погоды в Санкт-Петербурге	15
2. Исходный материал и его обработка	17
2.1 Выбросы загрязняющих веществ	17
2.2 Реанализ JRA-55	17
2.3 Атмосферное зондирование.....	19
3. Результаты.....	21
3.1 Количество выбросов в атмосферу за 2019 и 2020 года	21
3.2 Синоптическая обстановка	25
3.3 Приземная и приподнятая инверсия	37
3.4 Осадки	41
3.5 Перенос воздушных масс	44
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	48
Список используемой литературы	50

ВВЕДЕНИЕ

Содержание в воздухе аэрозольных частиц — один из основных параметров, характеризующих состояние загрязнения приземного слоя атмосферы. Аэрозоль отличается сильной динамикой, большим многообразием взаимодействий с солнечной радиацией, физическими полями (облачность, водяной пар, озон), а также с компонентами биосферы. Увеличение выбросов загрязняющих веществ в атмосферу от антропогенных источников влияет не только на здоровье человека, но и на климат.

Актуальность работы: в последние годы возникает все больше вспышек разнообразных массовых эпидемий: известных (например, лихорадка Эбола в 2014 году) и новых (например, COVID-19, начавшийся в конце 2019 года). В то же время мутируют уже существующие вирусы. Такие пандемические вспышки вынуждают административные органы власти вводить изоляцию как маленьких групп населения, так и целой группы стран. При уменьшении антропогенной нагрузки весной 2020 года во время карантинных мероприятий, можно оценить негативный вклад, который человечество ежедневно вносит в экологию окружающей среды, а также влияние метеорологических факторов, приводящих к накоплению или, наоборот, снижению концентраций вредных веществ.

Цель работы: анализ влияния метеорологических параметров и карантинного периода весной 2020 на изменение концентрации приземного аэрозоля в г. Санкт-Петербург.

Поставленные задачи:

- оценить изменение количества выбросов загрязняющих веществ в атмосфере в г. Санкт-Петербург в 2019-2020 гг.;
- оценить среднемесячное атмосферное давление за каждый год, выявить месяцы с принципиально разными синоптическими ситуациями;

- проанализировать влияние инверсионных дней в месяцах с большой разницей давления между двумя годами и определить их вклад как задерживающего слоя;
- сравнить распределение среднемесячных осадков за каждый год и оценить их влияние на вымывание приземного аэрозоля;
- рассмотреть осредненное за каждый месяц направления ветра у поверхности с целью анализа притока аэрозоля с соседних регионов.

1. Основные сведения

1.1 Аэрозольные частицы и их роль в атмосфере

Атмосфера содержит множество жидкостей и твердых веществ, которые существуют в воздухе в виде дисперсных фаз – они называются аэрозолями. Аэрозоль считается двухфазной системой, состоящей из твердых или жидких взвешенных частиц и газа (в воздухе). Аэрозоли образуются как из природных, так и из антропогенных источников. Примерами могут служить частицы пыли, образующиеся в результате ветровой эрозии поверхностных почв, сельскохозяйственной деятельности, морской соли и волн, разбивающихся об скалы. Другим источником является образование частиц в результате химических реакций в атмосфере. Например, сульфатные аэрозоли образуются при окислении диоксида серы в атмосферной влаге, частицы образуются в выхлопных газах автомобилей и при неполном сгорании ископаемого топлива на электростанциях. Аэрозоли оказывают прямое радиационное воздействие на климат, поскольку они рассеивают и поглощают солнечное и инфракрасное излучение в атмосфере. Аэрозоли также изменяют процессы образования теплых, ледяных и смешанных фазовых облаков, увеличивая количество капель, концентрацию и концентрацию частиц льда. Они снижают эффективность осаждения теплых облаков и тем самым вызывают косвенное радиационное воздействие, связанное с этими изменениями свойств облаков. Аэрозоли вносят негативный вклад в общее радиационное воздействие. [1] Одним из таких вкладов является то, что сажа в аэрозолях нагревает атмосферный слой, в котором они находятся [2]. Аэрозоли также влияют на здоровье биоты и оказывают воздействие на другие биологические эффекты (например, доступность питательных веществ). Биоаэрозоли действуют как ядра

конденсации облаков [3]. Важной характеристикой аэрозолей является то, что они имеют различное время жизни в атмосфере. Аэрозоли обычно имеют размеры в диапазоне от 2 нм до сотен микрометров и всевозможные формы [4,5]. Концентрация аэрозолей обычно выражается в массе частиц на единицу объема смеси (мг/м^3 или мкг/м^3).

Ниже приведены некоторые из источников аэрозолей:

- Почвенная пыль: Почвенная пыль вносит основной вклад в аэрозольную нагрузку и оптическую толщину, особенно в тропических и субтропических регионах. Регионами-источниками пыли являются в основном пустыни, высохшие русла рек и озер и полусухие окраины пустынь, а также районы в более сухих регионах, где растительность сократилась или поверхность почвы была нарушена деятельностью человека.
- Морская соль: Аэрозоли морской соли образуются в результате различных физических процессов, особенно при разрыве пузырьков воздуха во время образования белой шапки на поверхности. Этот тип аэрозоля может вносить основной вклад как в рассеяние света, так и в образование ядер облаков в тех регионах, которые находятся вблизи морской атмосферы.
- Промышленная пыль, первичные антропогенные аэрозоли: Транспортировка, сжигание угля, производство цемента, металлургия и сжигание отходов относятся к промышленным и техническим видам деятельности, которые производят первичные аэрозольные частицы.
- Углеродсодержащие аэрозоли (органический и черный углерод): Углеродсодержащие соединения составляют большую, но сильно изменчивую долю атмосферного аэрозоля. Органические вещества являются крупнейшим отдельным компонентом аэрозолей, сжигающих биомассу. Основными источниками углеродистых аэрозолей являются сжигание биомассы и ископаемого топлива, а также атмосферное окисление биогенных и антропогенных летучих органических соединений.

- Первичные биогенные аэрозоли: Первичный биогенный аэрозоль состоит из остатков растений (кутикулярный воск, фрагменты листьев и т.д.), гуминовых веществ и микробных частиц (бактерии, грибы, вирусы, водоросли, пыльца, споры и т.д.).
- Сульфатные аэрозоли: Сульфатные аэрозоли образуются в результате химических реакций в атмосфере из газообразных предшественников (за исключением сульфата морской соли и частиц гипсовой пыли).
- Нитратные аэрозоли: Аэрозоль нитрата тесно связан с относительным содержанием аммония и сульфата.
- Аэрозоли из вулканов: Два компонента вулканических выбросов имеют наибольшее значение для аэрозолей: первичная пыль и газообразная сера.

Многие аэрозольные частицы (например, сульфаты, вторичные органические соединения) не выбрасываются непосредственно, а образуются в атмосфере из газообразных предшественников, и аэрозольные частицы часто объединяются, образуя смешанные частицы с оптическими свойствами и временем жизни в атмосфере, отличными от свойств их компонентов. Кроме того, облака воздействуют на аэрозоли сложным образом, поглощая аэрозоли, добавляя массу за счет химии жидкой фазы и за счет образования новых аэрозольных частиц в облаках и вблизи них. Вторичные аэрозоли, которые образуются в результате атмосферных взаимодействий, также играют значительную роль в атмосфере.

Аэрозоли взаимодействуют как прямо, так и косвенно с радиационным балансом Земли и климатом. В качестве прямого эффекта аэрозоли рассеивают солнечный свет прямо обратно в космос. В качестве косвенного эффекта аэрозоли в нижних слоях атмосферы могут изменять размер облачных частиц, изменяя то, как облака отражают и поглощают солнечный свет, тем самым влияя на энергетический бюджет Земли. Таким образом,

косвенные эффекты изменяют радиационные свойства, количество и время жизни облаков. [6]

Классификация частиц. Независимо от происхождения и условий образования аэрозоль, содержащий твердые частицы размером менее 5,0 мкм, называется дымом, а содержащий мельчайшие частицы жидкости — туманом. Разновидностью тумана является смог, представляющий собой многокомпонентную смесь газов и аэрозольных частиц.

В состав смеси входят озон, оксиды азота и серы, многочисленные органические соединения перекисной природы. Смог возникает в результате фотохимических реакций при определенных условиях: наличии в атмосфере высокой концентрации оксидов азота, углеводородов и других загрязнений, интенсивной солнечной радиации и безветрия или очень слабого обмена воздуха в приземном слое.

Время пребывания частиц в атмосфере зависит как от их размеров и плотности, так и от состояния атмосферы (скорости ветра, состава, температуры). Крупные частицы обычно не переносятся в верхние слои атмосферы и оседают в течение нескольких часов вблизи источников их образования с рассеиванием у земной поверхности в подветренную сторону. Поэтому над крупными промышленными центрами образуются мощные скопления частиц пыли и аэрозолей.

Мелкие частицы (размер частицы меньше 1 мкм) имеют время пребывания в нижних слоях атмосферы 10—20 суток, что достаточно для их распространения на большие расстояния от источников образования. При этом за счет перемещений воздушных потоков они могут проникать в верхние слои тропосферы и из них — в стратосферу. Атмосферная пыль и аэрозоли ослабляют солнечное излучение в результате рассеяния, отражения и поглощения лучистой энергии.

При достаточно длительном сохранении интенсивных загрязнений атмосферы это приводит к понижению температур и локальным изменениям климатических условий, что наиболее заметно в крупных городах и промышленных центрах.

Форма аэрозолей, за исключением жидких капель, которые всегда сферические, частицы могут иметь различные формы. Их можно разделить на три основных класса:

1. Изометрические частицы, для которых в первом приближении все три размера совпадают. К этому классу относят сферы, правильные многогранники или частицы, близкие к ним по форме. Большинство научных представлений о поведении аэрозолей относится к изометрическим частицам.

2. Пластинки – частицы, имеющие два длинных размера и один короткий. К этому классу относятся лепестки или их кусочки, чешуйки, диски. Сведения о поведении пластинок в воздухе крайне скудные. Поэтому при описании их свойств необходимо стремиться к использованию значений, полученных при изучении изометрических частиц.

3. Волокна – частицы протяженные в одном направлении и имеющие сравнительно небольшие размеры в двух других. К их числу относятся призмы, иглы, нити или минеральные волокна, например волокна асбеста. Именно выяснение опасности для здоровья асбестовой пыли побудило к изучению поведения волокон в воздухе.

Форма частиц зависит от способа их получения и природы материала. Частицы, возникающие при конденсации молекул пара, имеют обычно сферическую форму, особенно если конденсация проходит через стадию образования жидкости. Частицы, образующиеся при измельчении больших образцов, редко бывают сферическими. Исключение – дробление жидких капель.

Структура. Аэрозольные частицы могут существовать сами по себе и объединяться в цепочки. Последние называют агломератами или

флоккулами. Агломераты обычно образуются из высокозаряженных маленьких частиц, которые находятся в плотных дымах или металлических возгонах.

Аэрозоли могут также состоять из полых капелек, заполненных газом, или полых частиц, содержащих вещество-наполнитель. Примером последних может служить летучая зола. Таким образом, плотность частицы может значительно отличаться от плотности исходного вещества. [7]

Для контроля за промышленными выбросами химических веществ были введены различные величины. Одной из таких мер является предельно допустимая концентрация (или ПДК) – величина, характеризующая максимальное количество вещества, которое может находиться в объекте измерений в момент времени без вреда для живых организмов. Эта величина считается основной величиной экологического нормирования содержания токсических веществ в природной среде.

Под ПДК следует понимать такую концентрацию химического соединения, которая при ежедневном воздействии на человеческий организм в течение длительного времени не вызовет у него каких-либо заболеваний или патологических изменений, обнаруживаемых современными методами исследования, а также не нарушит биологического оптимума для человека. При установлении ПДК веществ в воздушном бассейне населенных мест или в воздухе рабочей зоны ориентируются на токсикологический показатель вредности или рефлекторную реакцию организма. [8]

Единицей измерения ПДК в атмосферном воздухе является миллиграмм на кубический метр ($\text{мг}/\text{м}^3$).

При определении ПДК должно учитываться не только влияние загрязняющего вещества на здоровье человека, но также и его воздействие на растения, микроорганизмы, животных и природные сообщества. Таким образом, высшим показателем является экологическая предельно допустимая

концентрация – пороговая концентрация, превышение которой приводит к отрицательным последствиям для экосистемы в целом.

Для оценки воздушной среды используются следующие показатели:

- ПДК_{м.р.} – максимальная разовая концентрация токсического вещества в воздухе населенных мест (мг/м³). ПДК_{м.р.} не должна вызывать рефлекторных реакций в человеческом организме (ощущение запаха, световой чувствительности глаз и пр.) при кратковременном воздействии загрязнителя (в течение 20 мин).
- ПДК_{с.с.} – предельно допустимая среднесуточная концентрация вредного токсического вещества в воздухе населенных мест (мг/м³). В норме она не оказывает вредного воздействия (общетоксического, канцерогенного и др.) в условиях круглосуточного вдыхания (усреднение проводится за период 24 часа).

Выделяют четыре класса опасности вредных веществ: 1-й — чрезвычайно опасные, 2-й — высокоопасные, 3-й — умеренно опасные и 4-й — малоопасные. Эти классы определены исходя из смертельных концентраций веществ в воздухе. [9]

5 видов взвешенных веществ, которые будут рассматриваться в работе. Твердые вещества в атмосфере образуются различными путями. Первый появляются естественным способом. К ним относятся частицы, образующиеся в результате взрывных извержений вулканов, взрыва пузырьков на поверхности моря, пыльных бурь, лесных и торфяных пожаров. Они также содержат биогенные частицы, которые включают остатки растений, фрагменты животных, пыльцу, споры, водоросли, грибы, бактерии и вирусы, а также вторичные органические аэрозольные частицы, образующиеся в атмосфере из биогенных летучих органических соединений. Второй путь – антропогенный, образующийся в результате промышленных операций, процессов строительства и сноса зданий, дорожного движения, открытой добычи полезных ископаемых, выплавки металлов, сжигания

отходов и сжигания ископаемого топлива и биомассы. [10] Твердые вещества имеют 3-й класс опасности. Разовая ПДК взвешенных веществ составляет 0,5 мг/м³, среднесуточная ПДК – 0,15 мг/м³, среднегодовая ПДК – 0,075 мг/м³. Разовая ПДК PM10 – 0,3 мг/м³, среднесуточная ПДК – 0,006 мг/м³, среднегодовая ПДК – 0,04 мг/м³. Разовая ПДК PM2.5 – 0,16 мг/м³, среднесуточная ПДК – 0,035 мг/м³, среднегодовая ПДК – 0,025 мг/м³.

Диоксид серы (SO₂) представляет собой бесцветный, негорючий газ с удушливым, удушающим запахом. Он образуется естественным путем в результате геотермальной активности. Однако около 99% диоксида серы в атмосфере было произведено искусственно. Антропогенные источники включают переработку и сжигание ископаемого топлива (преимущественно угля и нефти), заводы по выплавке цветных металлов, железорудные заводы, целлюлозно-бумажные комбинаты, транспортные предприятия и сталелитейные заводы. Источники тепла включают отопление жилых, промышленных и коммерческих помещений (например, уголь, используемый в качестве топлива в домашнем камине). [11] Диоксид серы имеет 3-й класс опасности. Разовая ПДК этого вещества составляет 0,5 мг/м³, среднесуточная ПДК – 0,05 мг/м³.

Оксиды углерода (CO, CO₂). Оксид углерода CO («угарный газ») образуется в результате неполного сгорания ископаемого топлива (угля, газа, нефти) в условиях недостатка кислорода и при низкой температуре. При вдыхании угарный газ за счёт имеющейся в его молекуле двойной связи образует прочные комплексные соединения с гемоглобином крови человека и тем самым блокирует поступление кислорода в кровь. Оксид углерода CO₂ (углекислый газ) является продуктом полного окисления углерода. Оксид углерода малоопасный. Разовая ПДК данного вещества составляет 5 мг/м³, среднесуточная ПДК – 3 мг/м³.

Оксиды азота (NO, NO₂). Оксиды азота образуются во всех процессах горения, при этом чем выше температура, тем интенсивнее идет их

образование. Другим источником выбросов оксидов азота являются предприятия, производящие азотные удобрения, азотную кислоту, анилиновые красители и т.д. По масштабам выбросов оксидов азота в атмосферу транспорт занимает первое место (55%), затем следуют предприятия топливноэнергетического комплекса – 28%, крупные промышленные предприятия – 14%; оставшиеся 3% приходятся на мелкие предприятия и бытовой сектор. Оксид азота имеет 3-й класс опасности. Разовая ПДК данного вещества составляет 0,4 мг/м³, среднегодовая ПДК – 0,006 мг/м³.

Углеводороды - химические соединения углерода и водорода. К ним относят тысячи различных загрязняющих атмосферу веществ, образующихся в результате работы предприятий энергетики, химической промышленности, при добыче, транспортировке и переработке нефти, содержащихся в выбросах автотранспорта и т.д. [12]

1.2 Снижение антропогенной нагрузки весной 2020 года

Власти Китая 31 декабря 2019 года проинформировали Всемирную организацию здравоохранения о вспышке неизвестной пневмонии в городе Ухань в провинции Хубэй. Новая коронавирусная инфекция 2019-nCoV (COVID-19) очень быстро начала распространяться по всему миру. 11 марта 2020 года глава ВОЗ Тедрос Адханом Гебрейесус заявил, что распространение нового коронавируса носит характер пандемии, что означает необычайно сильную эпидемию, характеризующуюся распространением инфекционного заболевания на всей территории страны, территорию сопредельных государств, а иногда и многих стран мира.

Для борьбы с распространением вируса с 23 марта Россия ограничила авиасообщение со всеми странами мира, с 27 марта

РФ прекратила регулярное и чартерное авиасообщение с другими странами, что означает большое количество сокращенных рейсов в Санкт-Петербург и из него.

В целях борьбы с распространением коронавируса власти начали вводить ограничительные меры. С 14 марта 2020 года Министерство просвещения рекомендовало регионам перевести школьников на дистанционное обучение, затем на дистанционное обучение перешли студенты. 16 марта Минтруд рекомендовал перевести сотрудников на удаленную работу, а для тех, кто будет продолжать ходить на работу, ввести гибкий график, чтобы избежать большого скопления людей.

25 марта было объявлено о том, что в целях борьбы с распространением эпидемии период с 30 марта по 3 апреля включительно объявлен нерабочим.

2 апреля президент России сообщил о продлении периода нерабочих дней до 30 апреля. Это указание не касалось органов власти и предприятий с непрерывным производством. 28 апреля Владимир Путин подписал указ, продлевающий нерабочие дни с 6 по 8 мая 2020 года включительно. [13]

Из-за введенных ограничений в виде продолжительных нерабочих дней в городе Санкт-Петербург снизился поток людей едущих как на общественном автотранспорте, так и на собственных автомобилях. По этой причине по данным Администрации Санкт-Петербурга в городе были приняты следующие решения:

- С 28 марта по 30 апреля 2020 г – отменить 205 «коммерческих» автобусных маршрутов и 41 маршрут городского транспорта, увеличить интервал движения городских автобусных маршрутов;
- приостановка оказания услуг по краткосрочной аренде автомобилей с 13.04.2020 по 30.04.2020. [14]

Не смотря на то, что по указу президента предприятия с непрерывным производством могли не прерывать свою работу, некоторые для безопасности своих сотрудников приостановили дело. Так, например, производства на заводах Nokian Tyres [15] и ОАО «Климов» [16] были прерваны на неделю с 30 марта по 5 апреля 2020 г. А петербургский завод Nissan приостановил производство с 30 марта до конца апреля. [17]

1.3 Характеристика погоды в Санкт-Петербурге

Ленинградская область относится к зоне умеренного климата, переходного от океанического к континентальному, с умеренно мягкой зимой и умеренно теплым летом.

Основной особенностью климата здесь является непостоянство погоды, обусловленное частой сменой воздушных масс, которые, в зависимости от района формирования, подразделяются на морские, континентальные и арктические. Морские воздушные массы поступают с запада, юго-запада или северо-запада при перемещении через северо-западные районы России атлантических циклонов. Циклоны приносят пасмурную, ветреную погоду и осадки. Зимой они являются причиной резких потеплений, а летом, наоборот, несут прохладу. С востока, юга или юго-востока входит сухой континентальный воздух. В антициклонах, сформировавшихся в этих воздушных массах, устанавливается малооблачная и сухая погода, летом жаркая, а зимой холодная. С севера и северо-востока, главным образом со стороны Карского моря, приходит сухой и всегда очень холодный арктический воздух, формирующийся надо льдом. Вторжения арктических воздушных масс сопровождаются наступлением ясной погоды и резким понижением температуры воздуха. В областях повышенного давления, сформировавшихся в этих воздушных массах, даже летом наблюдаются заморозки, а зимой – наиболее сильные морозы. Разнообразие синоптических

процессов и частая смена воздушных масс являются причиной больших межсуточных колебаний метеопараметров. Перепады температуры воздуха, обусловленные сменой воздушных масс, могут значительно превышать амплитуду суточных колебаний и нередко достигают $\pm 20^\circ$ и более.

Весна в Петербурге обычно наступает в конце марта, когда дневные температуры воздуха становятся устойчиво положительными и начинает сходить снежный покров. Весна «пробуждается» медленнее, чем в соседних, более континентальных районах: сказывается влияние охлаждённых за зиму крупных водоёмов. Средняя суточная температура выше 0°C устанавливается в начале апреля, вскоре после таяния снега; она достигает 5°C к концу апреля и 10°C в мае. Атмосферное давление весной наибольшее, и циклоны редки, поэтому погода сравнительно устойчивая. Число дней с осадками меньше, чем в другие периоды года, 13,9 в марте (12,7-12,8 в апреле, мае), по сравнению с зимой меньше облачность (8-10 дней с ясной погодой), ниже относительная влажность воздуха (76 % в марте и 60 % в мае) и скорость ветра. Однако нередко бывает возврат холода. Северо-восточные ветры приносят из арктических морей похолодание, иногда длительное, ночные заморозки; они же гонят в Неву ладожский лёд. В среднем последний заморозок отмечается 5 мая, но возможен и до 28 мая, а на почве — 6 июня (1962 год). В целом, за весь календарный весенний период в Санкт-Петербурге (с 1 марта по 31 мая) температура может колебаться от ~ -25 градусов в марте до $\sim +30$ градусов в мае (если считать в целом по годам за весь период наблюдений). [18]

2. Исходный материал и его обработка

2.1 Выбросы загрязняющих веществ

Данные по выброшенному количеству аэрозоля антропогенного характера в атмосферу были взяты из обобщенных данных о выбросах загрязняющих веществ в атмосферу Федеральной службы по надзору в сфере природопользования и из докладов об экологической ситуации в Санкт-Петербурге за 2019 и 2020 года.

2.2 Реанализ JRA-55

Реанализ – это последовательная повторная обработка архивных наблюдений за погодой с использованием современной системы прогнозирования. Реанализ создает наборы данных с координатной сеткой за несколько десятилетий, которые оценивают большое разнообразие параметров атмосферы, состояния моря и поверхности суши, в том числе многие из тех, которые не наблюдаются непосредственно. Такие наборы данных стали основополагающими для исследований и образования в области наук о Земле.

Реанализ отличается от традиционных методов обработки наблюдений полезностью информационных продуктов. Он опирается на модели для интерпретации, сопоставления и объединения множества различных наблюдений из нескольких источников. Виды наблюдения, которые могут быть усвоены, ограничиваются лишь условием их точного моделирования. При усвоении данных используется априорная информация о неопределенностях в моделях и наблюдениях для проверки качества,

получения поправок на погрешность и присвоения данных пропорциональных весов. Уравнения движения и физических процессов, представленные в модели прогноза, используются для создания продуктов данных, которые являются пространственно полными и физически непротиворечивыми. По сути, цель реанализа состоит в том, чтобы получить всестороннее описание наблюдаемой атмосферной циркуляции с использованием как можно большего количества информации.

Несколько поколений повторных анализов атмосферы были проведены в Национальных центрах экологического прогнозирования (NCEP) [19], Национальном агентстве по авиации и исследованию космического пространства (NASA) [20,21], Европейском центре для среднесрочных прогнозов погоды (ECMWF) [22,23,24] и в Японском метеорологическом агентстве (JMA) [25]. Самым последним глобальным реанализом атмосферы является японский 55-летний реанализ (JRA-55) [26], заверченный в JMA в 2013 г., но еще не полностью задокументированный. [27]

Японский 55-летний реанализ (JRA-55) охватывает период с 1958 г., когда в глобальном масштабе начались регулярные радиозондовые наблюдения. JRA-55 — это первый всесторонний реанализ, охватывающий последние полвека после 45-летнего реанализа Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (ERA-40), и первый реанализ, в котором к применен четырехмерный вариационный анализ к этому периоду. Основные цели JRA-55 заключались в решении проблем, обнаруженных в предыдущих реанализах, и в создании всеобъемлющего набора атмосферных данных, пригодных для изучения многолетней изменчивости и изменения климата.

JRA-55 был произведен с версией TL319 системы усвоения оперативных данных JMA по состоянию на декабрь 2009 г., которая была значительно улучшена по сравнению с японским 25-летним реанализом (JRA-25). В нем также используется ряд новых и усовершенствованных прошлых наблюдений. Полученные продукты реанализа значительно лучше,

чем продукт JRA-25. Двумя основными проблемами JRA-25 были холодный уклон в нижней стратосфере, который был уменьшен, и сухой уклон в бассейне Амазонки, который был смягчен. Временная согласованность температурного анализа также была значительно улучшена по сравнению с предыдущими продуктами реанализа. [28]

2.3 Атмосферное зондирование

Атмосферное зондирование – это измерение вертикального распределения параметров атмосферы, таких как давление, температура, температура точки росы, скорость и направление ветра (таким образом определяется сдвиг ветра), содержание жидкой воды, концентрация озона, загрязнение и другие свойства.

Такие измерения выполняются различными способами, включая дистанционное зондирование и наблюдения на месте. Наиболее распространенным зондированием на месте является радиозонд. Он состоит из датчиков, которые непосредственно измеряют атмосферные компоненты, такие как термометры, барометры и датчики влажности, и воздушного шара, с помощью которого датчики поднимаются в воздух [29]. Его запускают два раза в сутки – в 00 UTC и в 12 UTC.

Данные радиозондирования были взяты из открытого источника – Университета Вайоминга, для того, чтобы подсчитать число случаев изотермии и приземной и приподнятой инверсии. Эти явления рассматривались для слоя атмосферы от поверхности земли до 1000 м. В таблице 2.3.1 для примера приведены какие данные использовались для расчета вертикального градиента температуры по формуле

$$\gamma = \frac{t_{\text{В}} - t_{\text{Н}}}{z_{\text{В}} - z_{\text{Н}}} * 100,$$

где γ – вертикальный градиент температуры, °С/100м;

$t_{\text{В}} - t_{\text{Н}}$ – разность температур воздуха на верхнем и нижнем уровнях, °С;

$z_{\text{В}} - z_{\text{Н}}$ – разность высот, м.

Таблица 2.3.1 – Вертикальный градиент температуры и данные для его расчета для первых трех дней февраля

Дата и время	Высота, м	Температура воздуха, °С	Градиент температуры, °С/100 м
01.02 00Z	72	-4.3	-0.4
	791	-7.4	
01.02 12Z	72	-3.1	-0.6
	802	-7.5	
02.02 00Z	72	-4.5	-0.1
	760	-5.3	
02.02 12Z	72	-3.3	0.1
	988	-2.5	
03.02 00Z	72	-4.3	0.3
	823	-1.7	
03.02 12Z	72	-2.9	0
	901	-2.9	

Считается, что изотермия наблюдалась при значениях вертикального градиента температуры от -0,4 до 0,4 °С/100 м, приземная инверсия – при значениях выше 0,4 °С/100 м.

3. Результаты

3.1 Количество выбросов в атмосферу за 2019 и 2020 года

Первоначально в работе была рассмотрена средняя концентрация взвешенных частиц за 2019 и 2020 года в городе Санкт-Петербург. Для 2019 года она составила 0,5 ПДКс.с. (среднесуточная предельно допустимая концентрация). В течение года среднемесячные концентрации в целом по городу изменялись в пределах 0,4-0,8 ПДКс.с., наибольшая отмечалась в апреле (рисунок 3.1.1).

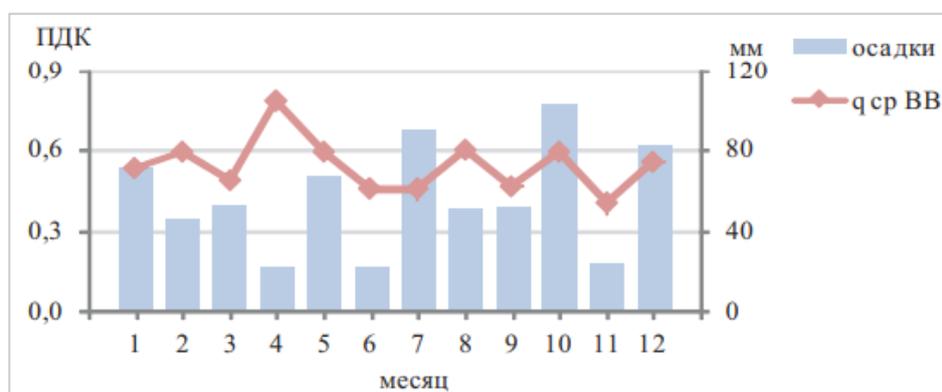


Рисунок 3.1.1 – Годовой ход среднемесячных концентрация (в долях ПДК) взвешенных веществ в целом по городу и количества осадков в 2019 г. [30]

Для 2020 года средняя концентрация взвешенных веществ в г. Санкт-Петербург составила 0,8 ПДКс.с.. В течение года среднемесячные концентрации изменялись в пределах 0,5-1,6 ПДКс.с., наибольшая из них отмечалась в апреле (рисунок 3.1.2)

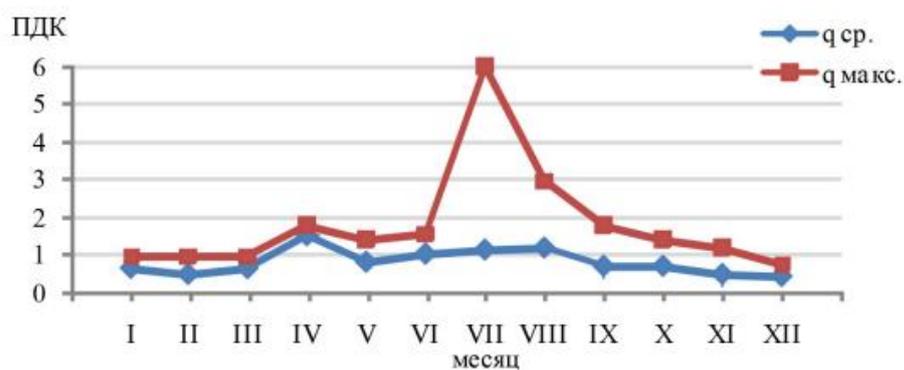


Рисунок 3.1.2 – Годовой ход максимальных и среднемесячных концентрация (в долях ПДК) взвешенных веществ в целом по городу [31]

После этого по данным о выбросах загрязняющих веществ в атмосферу Федеральной службы по надзору в сфере природопользования было определено суммарное количество выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух (рисунок 3.1.3). В 2020 году выбросов было больше на 112 тонн, чем в 2019 году.

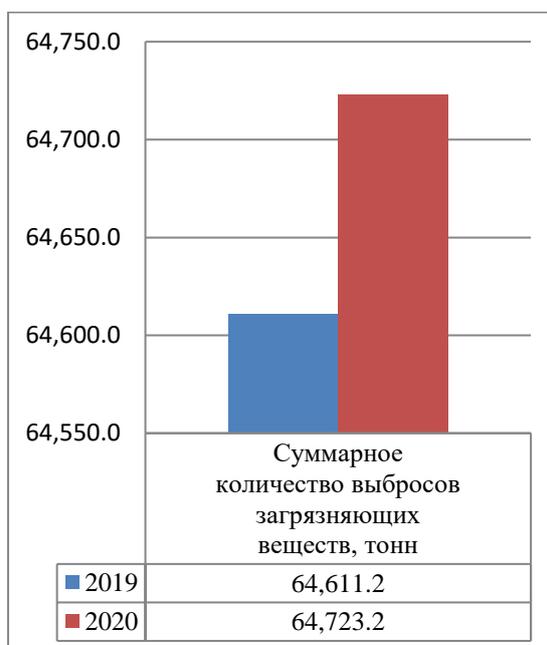
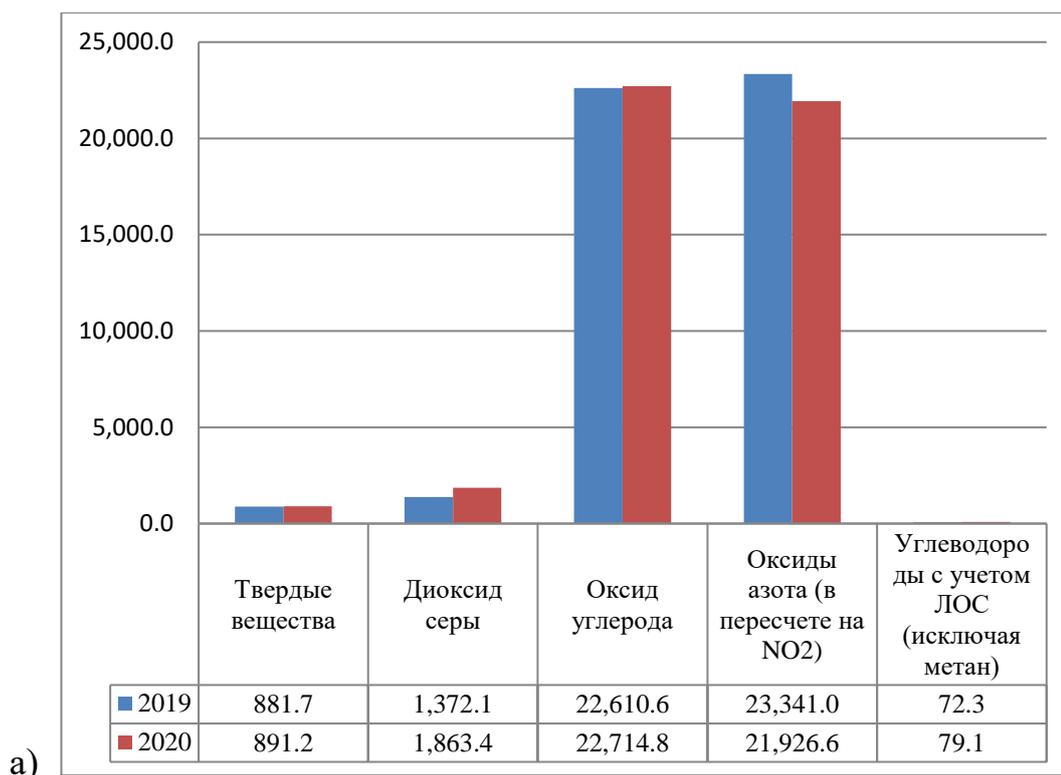


Рисунок 3.1.3 – Суммарное количество выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух, тонн

Рассмотрена разница выбросов частиц, загрязняющих атмосферный воздух, между 2019 и 2020 годами из различных источников антропогенного происхождения. Сравнено количество выбросов твердых веществ (пыль, дым, сажа), диоксида серы, оксида углерода, оксида азота, углеводородов с учетом летучих органических соединений на рисунке 3.3.4.



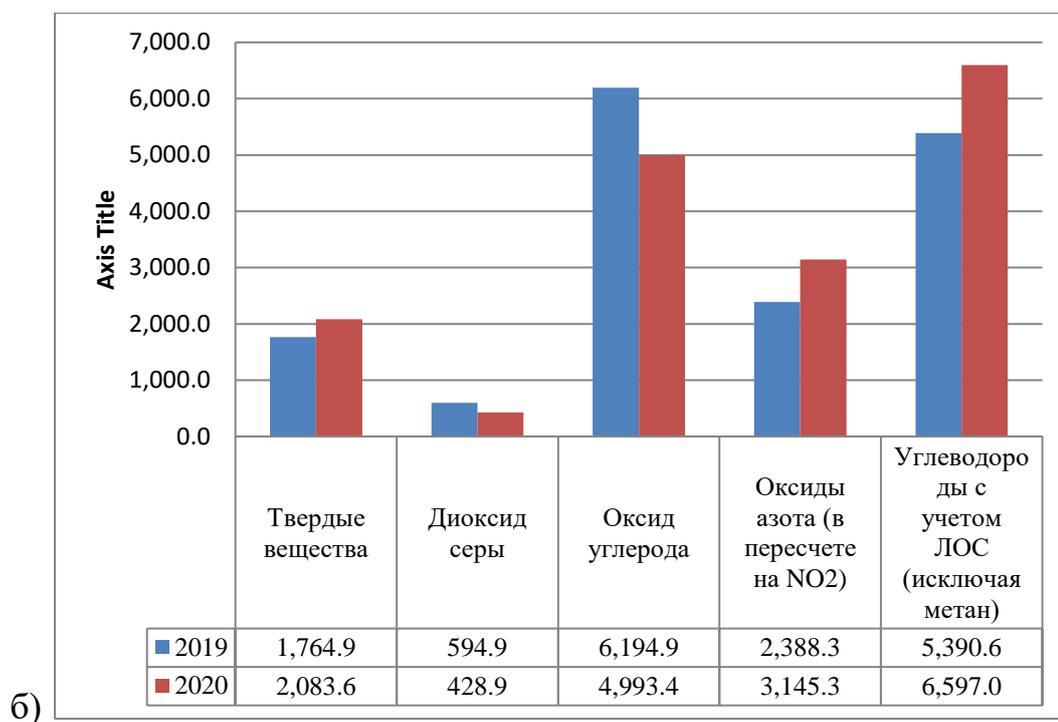


Рисунок 3.1.4 – а) Выбросы загрязняющих веществ в атмосферный воздух от сжигания топлива в целом по Санкт-Петербургу, тонн; б) Выбросы загрязняющих веществ в атмосферный воздух от технологических и других процессов в целом по Санкт-Петербургу, тонн

На диаграмме 3.1.4а видно, что от сжигания топлива, количество выбросов загрязняющих веществ принципиально не различается. Количество оксида азота в 2020 г. меньше, чем в 2019 г., для остальных веществ – ситуация является прямо противоположной. На диаграмме 3.1.4б от технологических и других процессов в 2020 году количество выбросов твердых веществ было незначительно больше, чем в 2019 году, а оксида серы и углеводородов (с учетом ЛОС) – существенно больше. Обратная ситуация наблюдается для таких веществ, как диоксид серы и оксида углерода.

Стоит учесть, что в 2020 году увеличилось количество объектов, имеющих выбросы загрязняющих веществ на 175 единиц и количество источников выбросов загрязняющих веществ на 3852 единицы (рисунок 3.1.5).

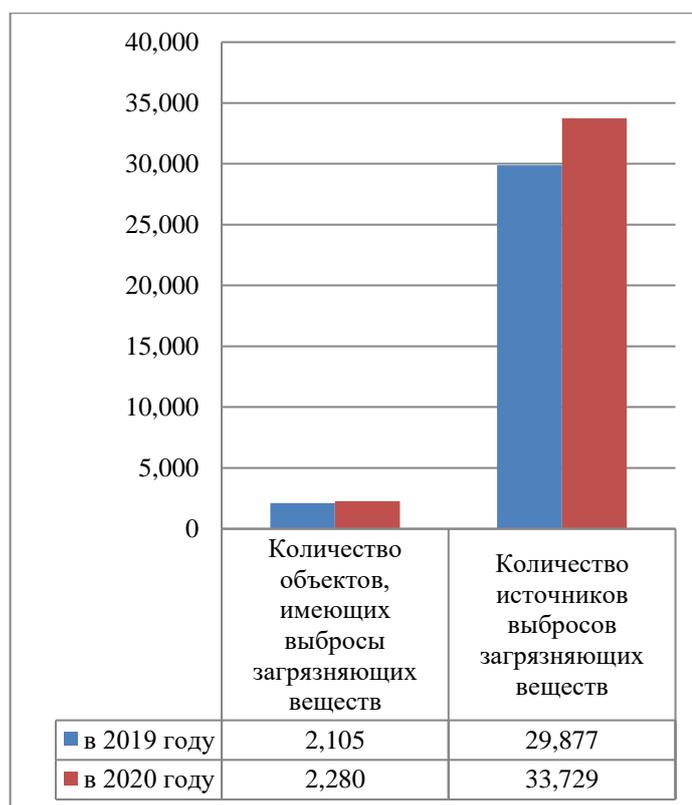


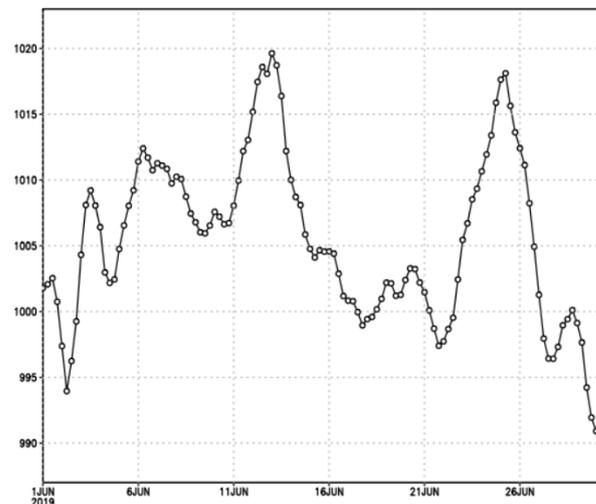
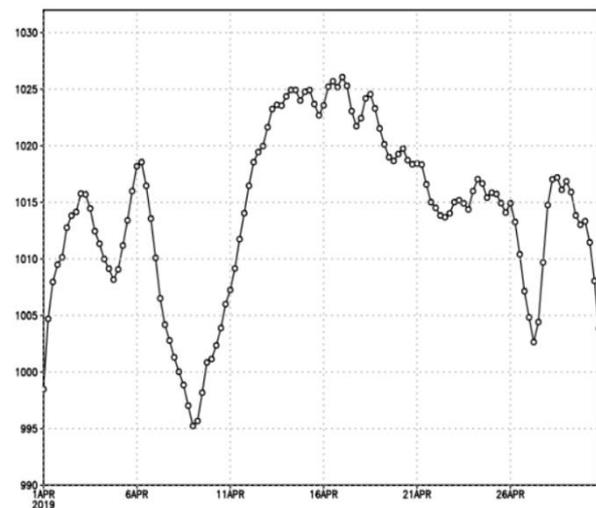
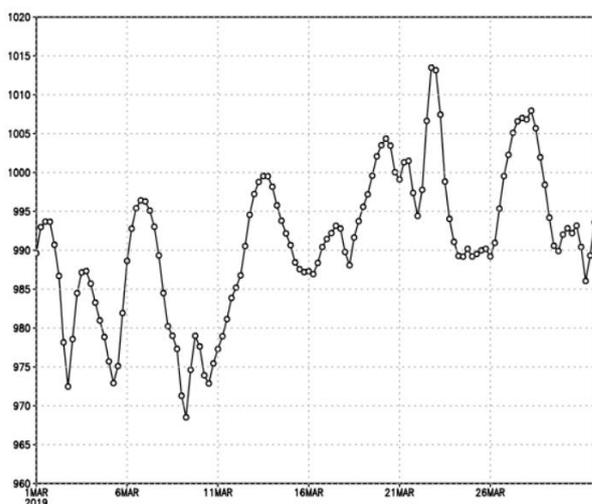
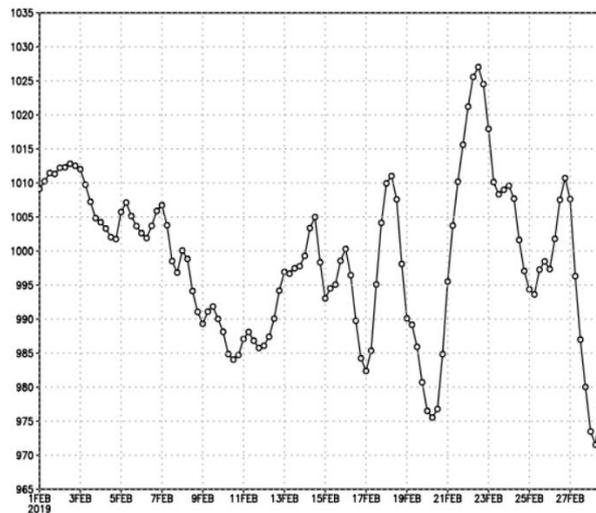
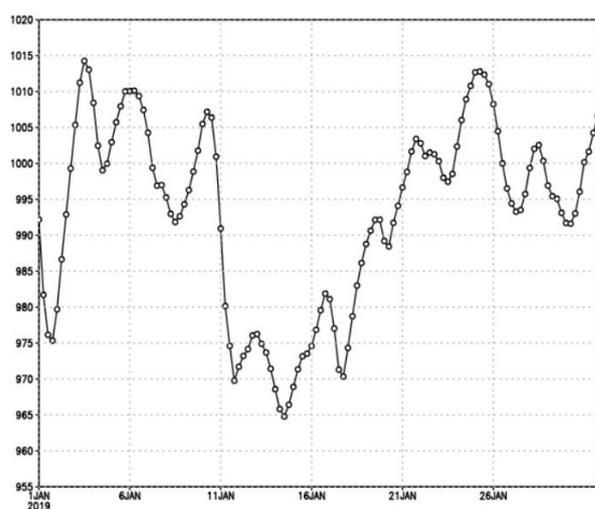
Рисунок 3.1.5 – Количество источников загрязнения атмосферы

К объектам, являющимися источниками загрязнения окружающей среды, относятся промышленные предприятия – это представляет собой общее понятие. Источниками считаются дымовые трубы заводов и котельных, газоотходы, технологические установки и дефлекторы, автомобильный транспорт и тд.

3.2 Синоптическая обстановка

Перед использованием данных реанализа JRA-55 была проведена оценка точности, для этого они были сравнены с фактическими данными, взятых с Обнинского сайта. Для проверки были сопоставлены графики давления за 2019 год для каждого месяца. На рисунке 3.2.1 представлено распределение давления по каждому месяцу 2019 года по данным реанализа.

На рисунке 3.2.2 представлено распределение давления по каждому месяцу 2019 года по фактическим данным.



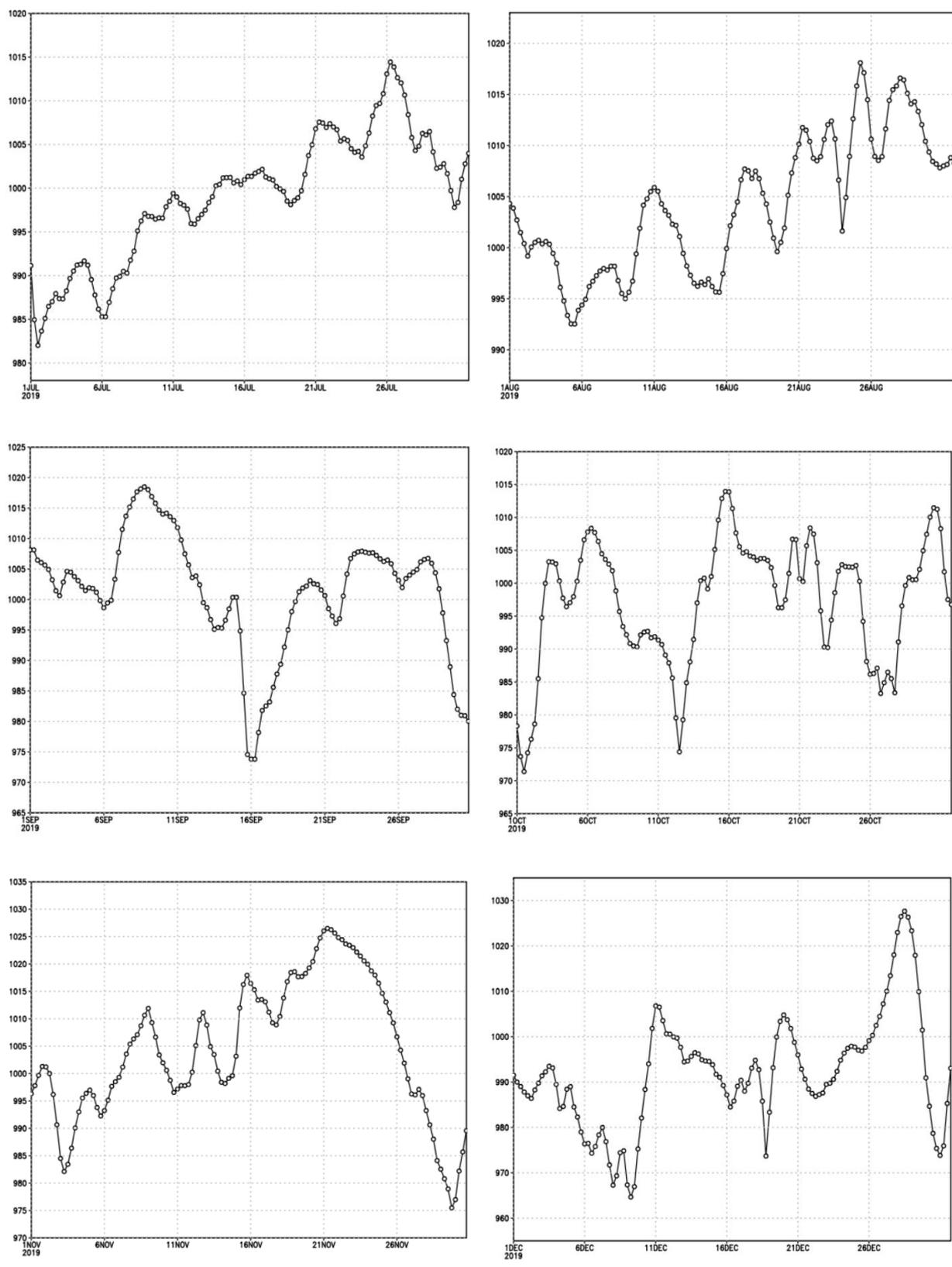
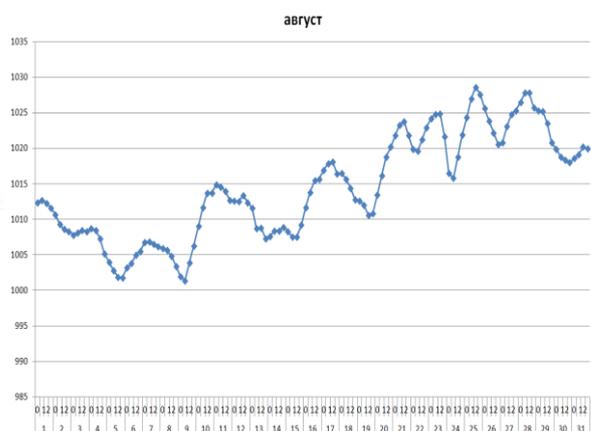
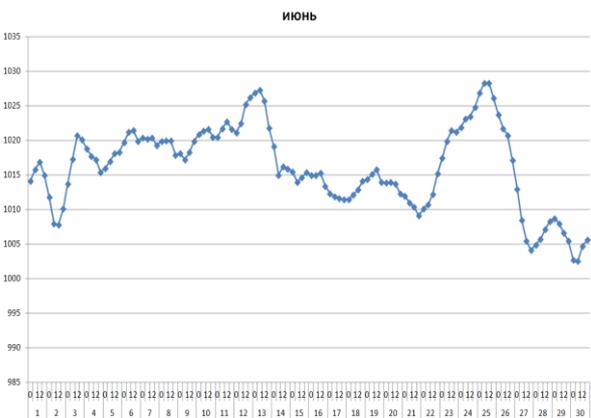
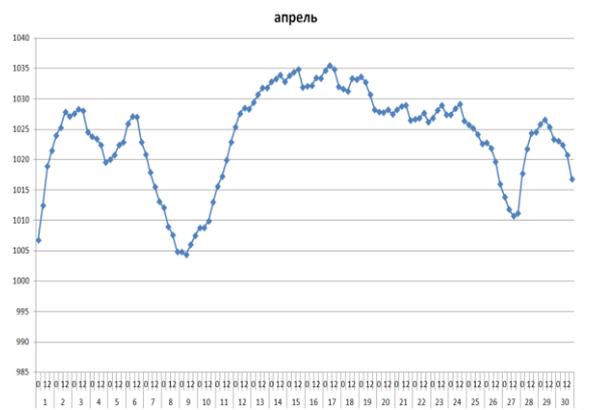
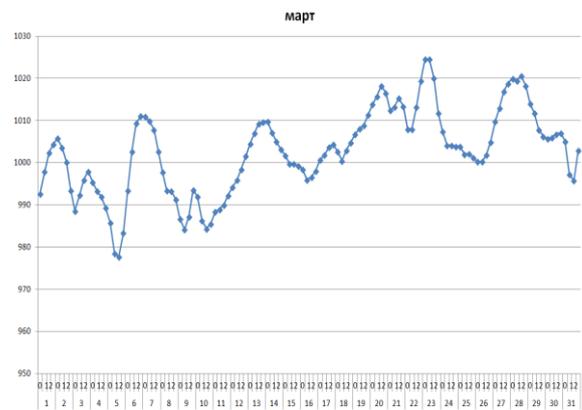
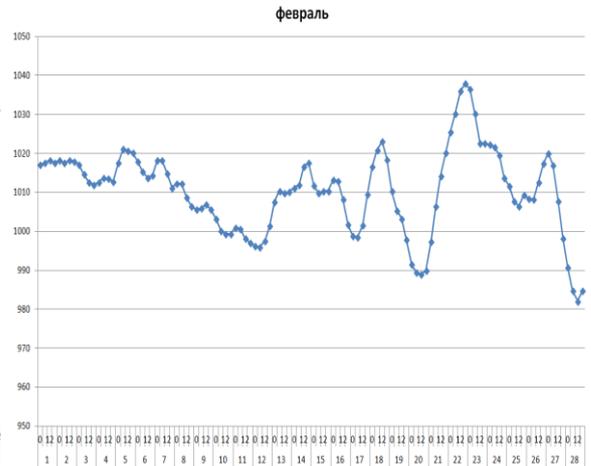
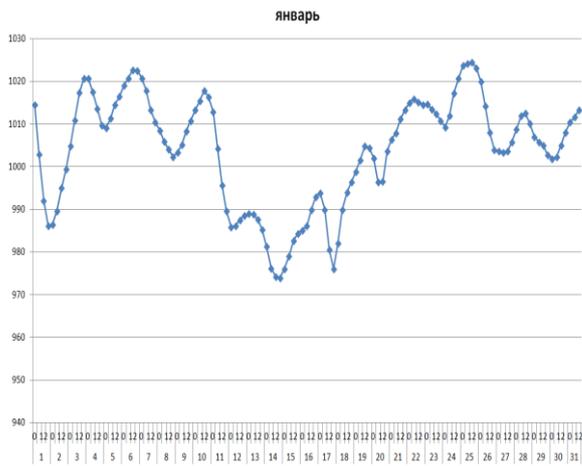


Рисунок 3.2.1 – Распределение давления по каждому месяцу 2019 года по данным реанализа



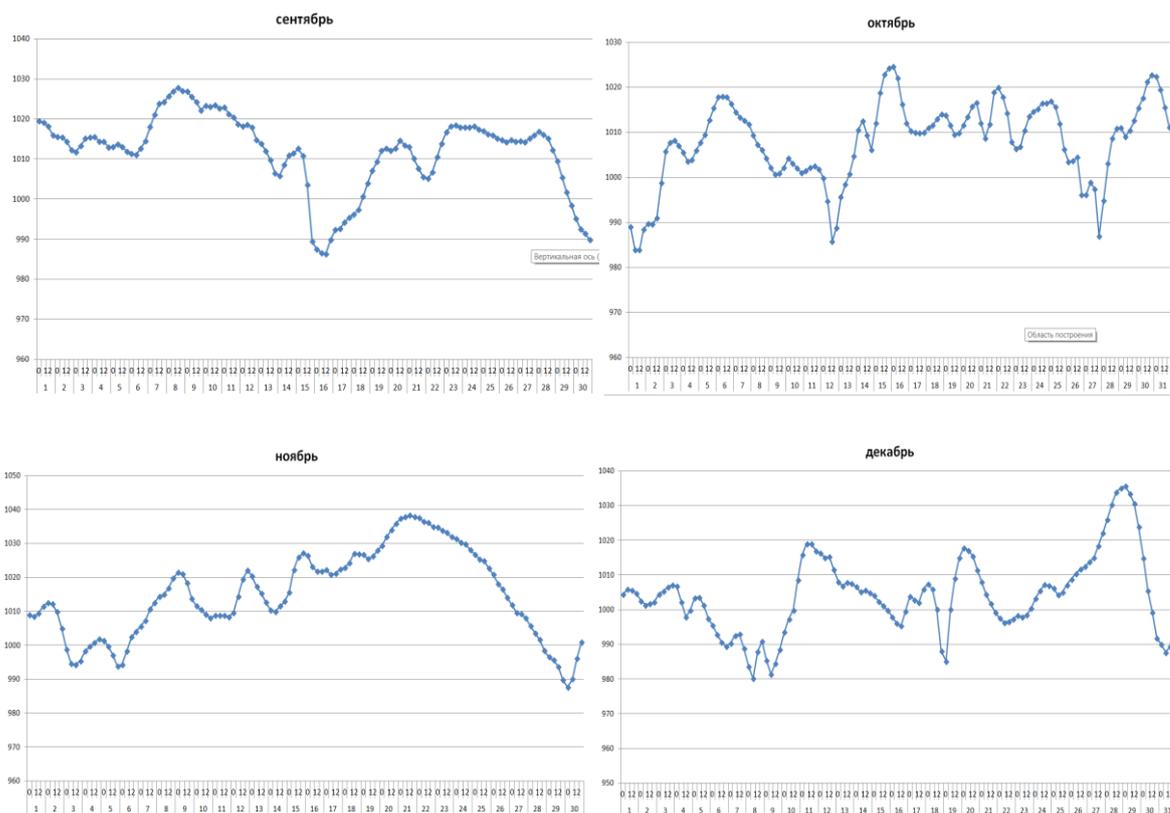


Рисунок 3.2.2 – Распределение давления по каждому месяцу 2019 года по фактическим данным

При сравнении графиков можно отметить, что ход распределения давления полностью совпадает. Все экстремумы в графиках реанализа соответствуют экстремумам в графиках фактических данных. Различие присутствует в самих значениях давления. В целом разница давления составляет от 5 до 15 гПа. Эту разницу можно объяснить тем, что координаты станции, с которой были взяты фактические данные, и координаты в реанализе – разные. Координаты у станции – $59^{\circ} 58'$ с. ш. $30^{\circ} 18'$ в. д., а координаты в реанализе – 60° с. ш. 30° в. д.. Это различие получается, так как в реанализе задается определенная точка на сетке, в которой рассчитывается параметр. Количество шагов по широте – 72, по долготе – 46. Получается, что ближайшая точка на сетке к г. Санкт-Петербург располагается с координатами 60° с. ш. 30° в. д..

Из этого следует, что данные реанализа достоверны и их можно использовать в работе в дальнейшем.

В первую очередь, чтобы рассмотреть синоптические условия в 2019 и 2020 годах по данным реанализа JRA-55 в программе OpenGrADS представим среднемесячное давление в этих годах.

Обратим внимание на месяца с повышенным давлением, так как в антициклонах проходят нисходящие потоки воздуха, а значит, взвешенные частицы будут накапливаться у поверхности земли, и на месяцы с малоградиентным полем с границами у повышенного давления, поскольку в нем ветра имеют маленькую скорость и нет сильных вертикальных движений, из чего следует, что будет присутствовать накопление загрязняющих веществ. На рисунке 3.2.3 видно, что в 2019 году такие ситуации преобладали в феврале, апреле и августе.

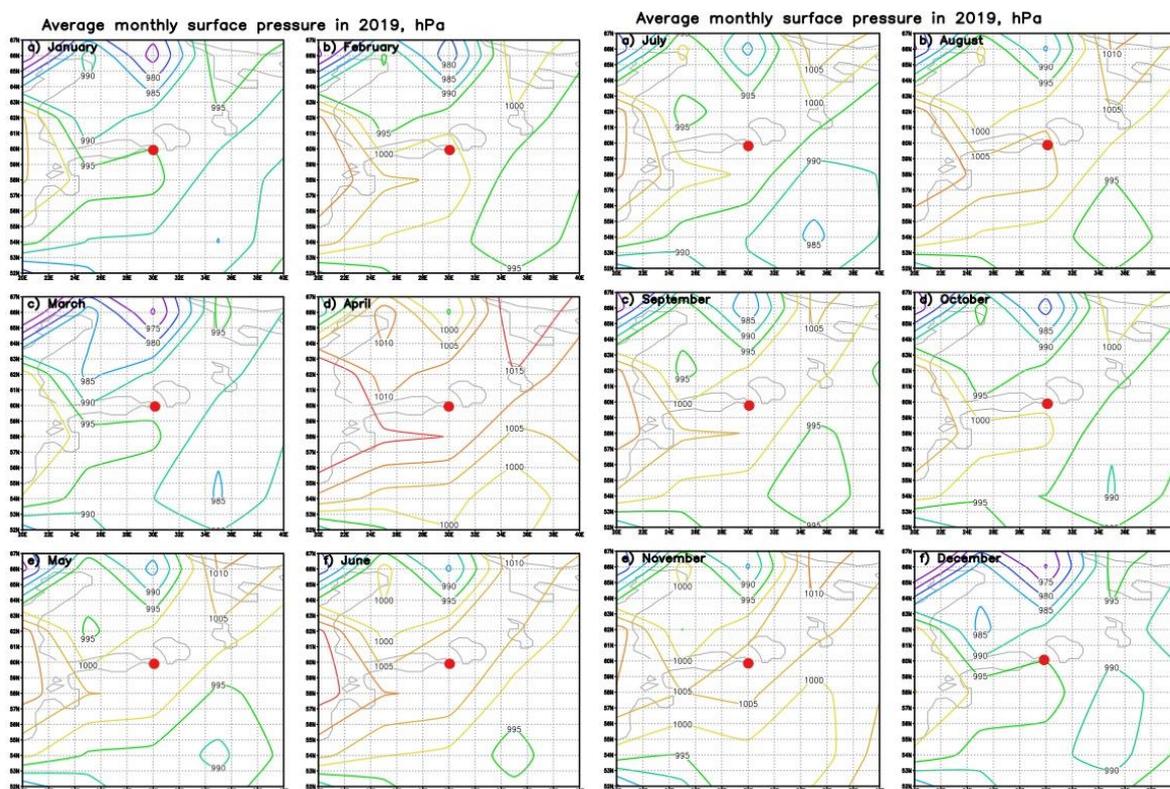


Рисунок 3.2.3 – Среднемесячное приземное давление в 2019 году, гПа

В 2020 году такие ситуации наблюдались в месяцах – апрель, июнь, сентябрь, октябрь, ноябрь, декабрь (рисунок 3.2.4).

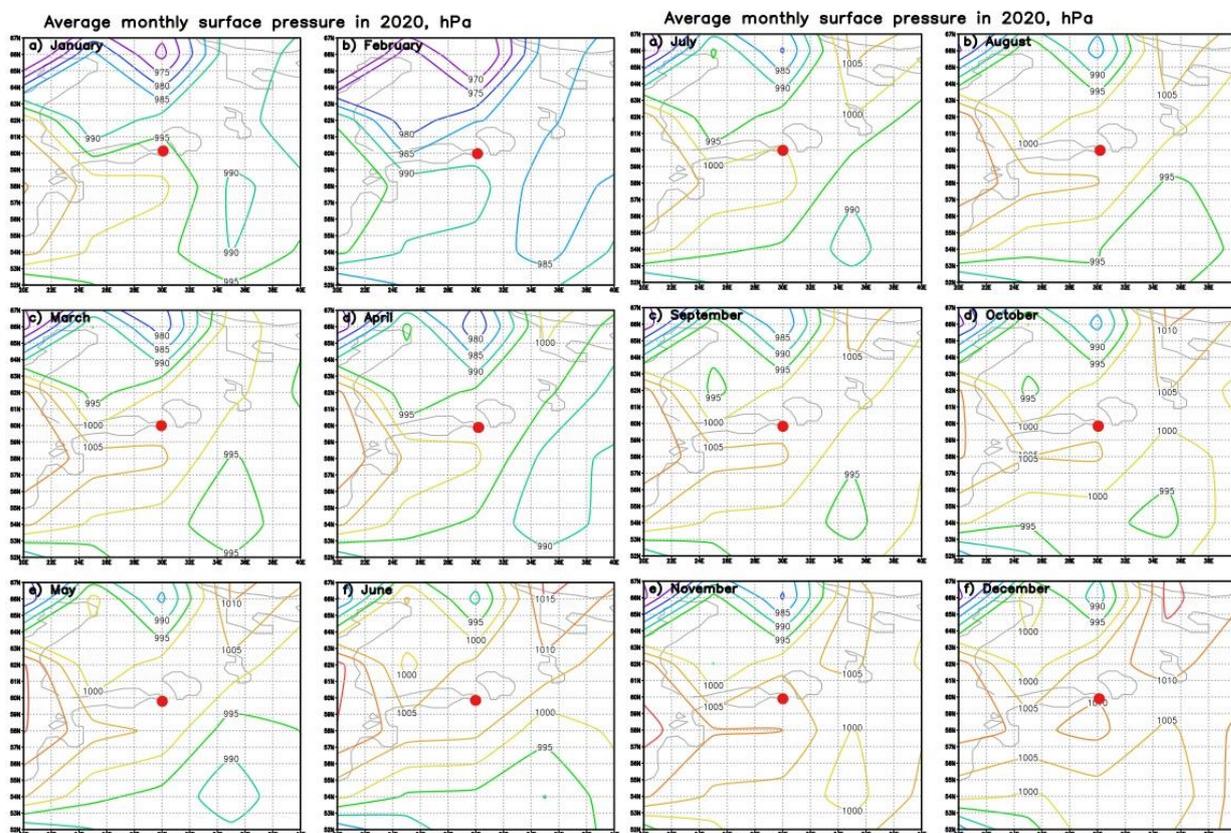


Рисунок 3.2.4 – Среднемесячное приземное давление в 2020 году, гПа

Далее рассмотрим насколько различалась синоптическая ситуация между двумя годами. Для этого представим разницу среднемесячного давления между этими годами (рисунок 3.2.5). При построении графиков вычитаем из 2019 года 2020.

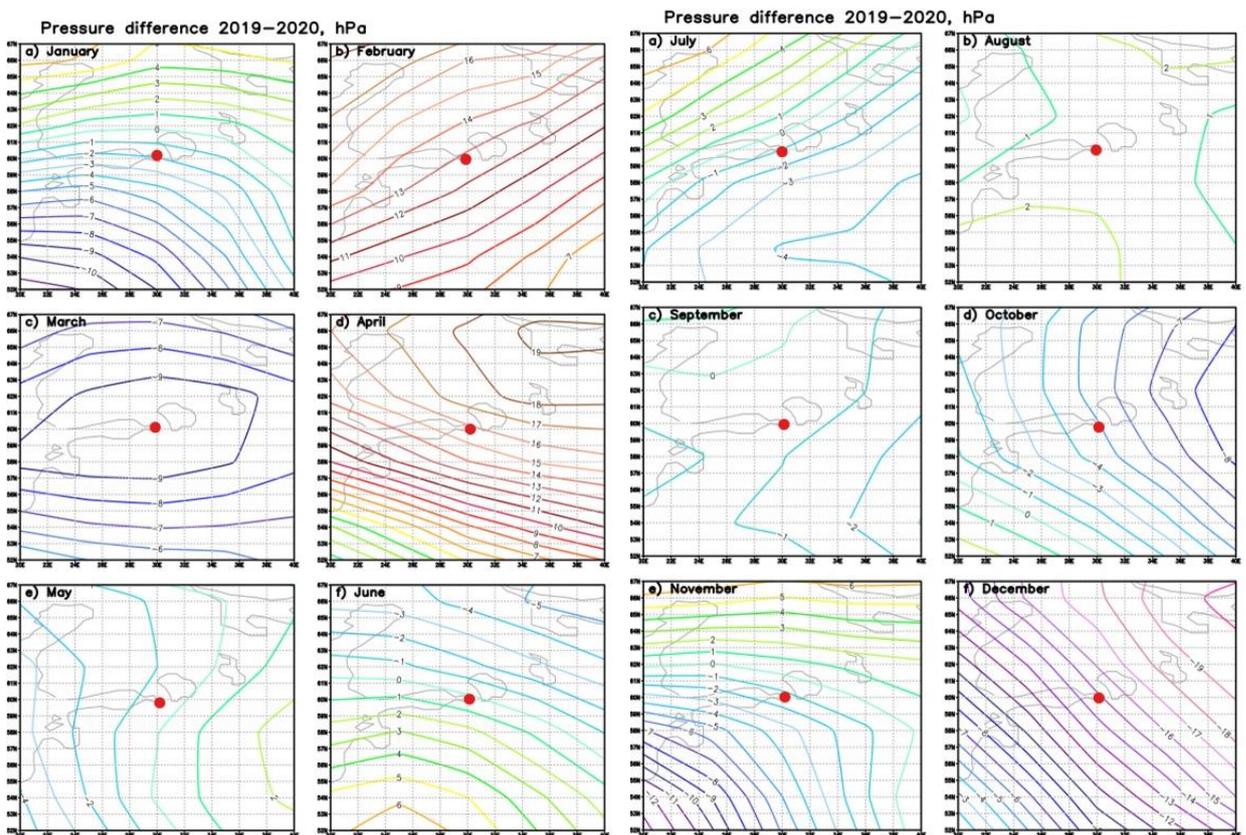


Рисунок 3.2.5 – Разница между среднемесячными давлениями 2019 и 2020 гг., гПа

Обратим внимание на месяцы, где давление принципиально отличалось. Можно выделить два месяца, где в 2019 году давление было много выше, чем в 2020 г. – февраль и апрель, где разница составляет 13 гПа и 16 гПа соответственно. Прямо противоположная ситуация для декабря – накопление загрязняющих веществ в декабре 2020 года было больше, чем в том же месяце 2019 года.

Рассмотрим каждый месяц по отдельности.

На рисунке 3.2.6 видно, что при сравнении приземного давления в феврале между двумя годами в течение всего периода месяца данный параметр был больше в 2019 году, чем в 2020 году. Самая большая разница наблюдалась в начале месяца с 1 по 5 число и в конце – с 21 по 25 число. Это

значит, что вероятность инверсионных случаев больше в 2019г, чем в 2020. Ниже я подтвержу это на аэрологических диаграммах зондирования.

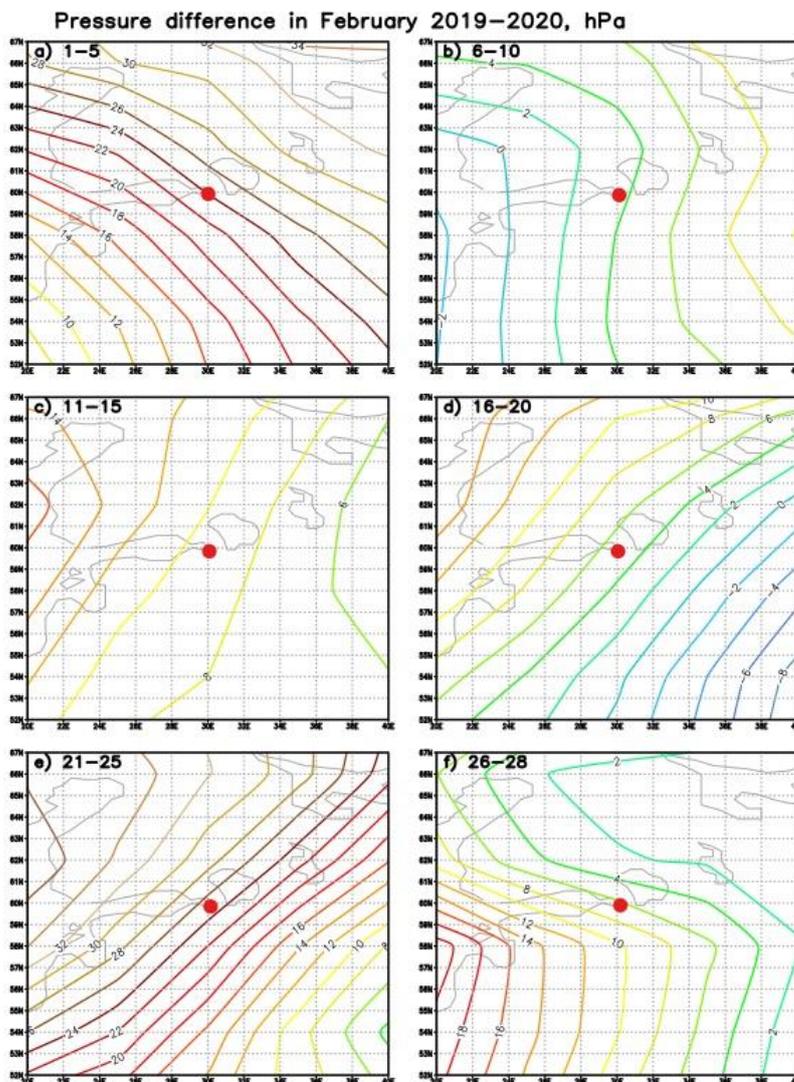


Рисунок 3.2.6 – Разница между приземным давлением осредненным за 5 дней в феврале 2019 и 2020 гг., гПа

Посмотрим также разницу приземного давления осредненное за 5 дней в марте, так как в середине этого месяца начался карантин. На рисунке 3.2.7 можно наблюдать, что в период с 1 по 20 число давление изменяется незначительно, кроме промежутка с 6 по 10 число. В конце месяца с 21 по 31

число давление 2020 году было гораздо выше, чем в 2019 году. Самая большая разница наблюдалась в конце месяца – с 21 по 25 число. Можно сделать вывод, что вероятность инверсионных случаев в марте была больше в 2020 г., чем в 2019 г.

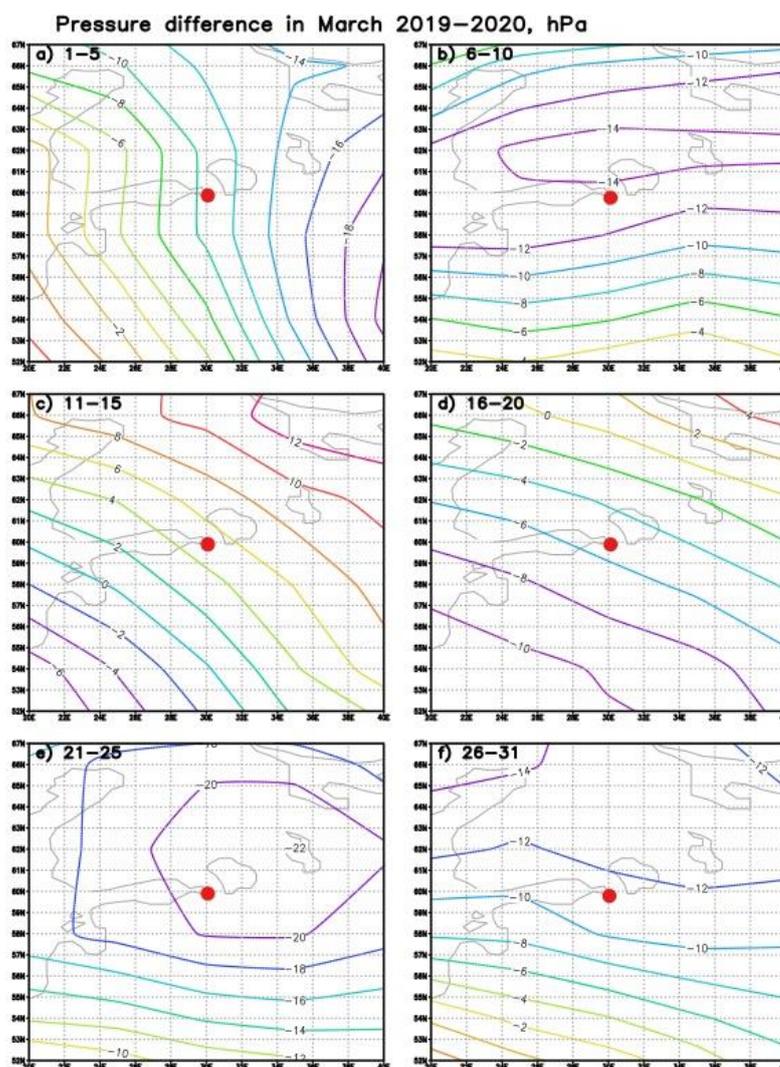


Рисунок 3.2.7 – Разница между приземным давлением осредненным за 5 дней в марте 2019 и 2020 гг., гПа

Как видно на рисунке 3.2.8 в 2019 году в период всего месяца апреля давление было сильно выше, чем в 2020 г. Самая большая разница

наблюдалась в середине месяца с 11 по 20 число. Это значит, что вероятность инверсионных случаев больше в 2019 г., чем в 2020 г.

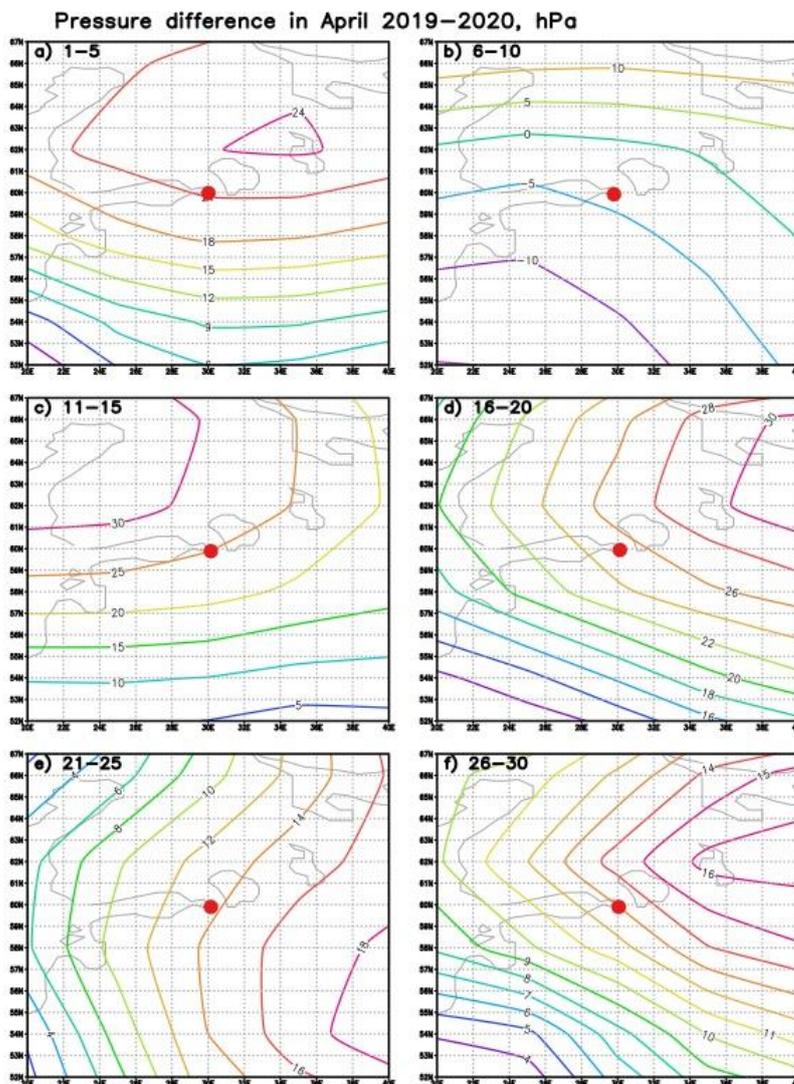


Рисунок 3.2.8 – Разница между приземным давлением осредненным за 5 дней в апреле 2019 и 2020 гг., гПа

Из рисунка 3.2.9 можно сделать вывод, что в период всего декабря приземное давление в 2020 году было выше, кроме последних пяти дней (с 26 по 31 число). Самая большая разница наблюдалась с 6 по 20 число – 37 гПа. Хотя в период с 26 по 31 декабря давление было выше в 2019 году,

следует заметить, что разница составила – 3 гПа и что это является совсем незначительным значением. В результате вероятность инверсионных случаев в декабре была больше в 2020 г., чем в 2019 г.

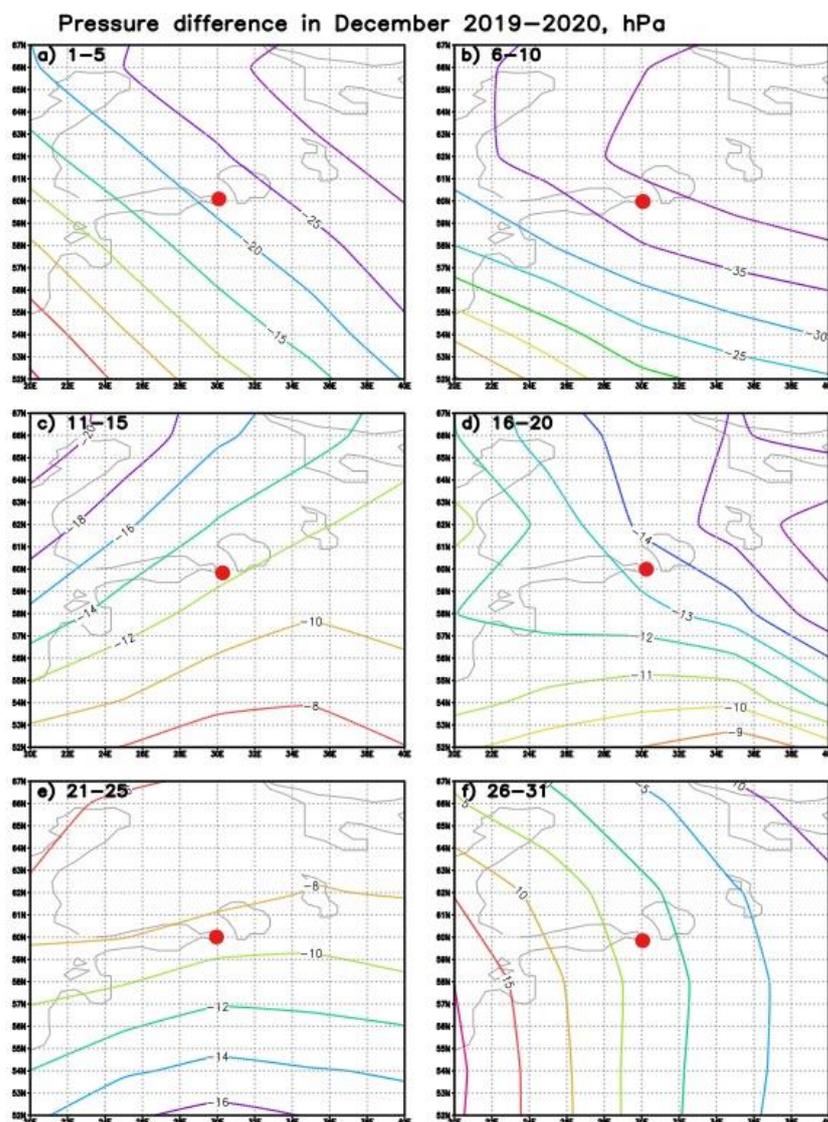


Рисунок 3.2.9 – Разница между приземным давлением осредненным за 5 дней в декабре 2019 и 2020 гг., гПа

На примере декабря рассмотрим распределение концентрации диоксида азота в период всего месяца (рисунок 3.2.10). В декабре 2019 года

суммарная концентрация данного аэрозоля составила 17.6 ПДКс.с., в декабре 2019 года – 20,6 ПДКс.с. Максимальная разница величин между двумя годами наблюдается в период с 7 по 10 число, когда разница приземного давления была наибольшей в этом месяце (37 гПа).

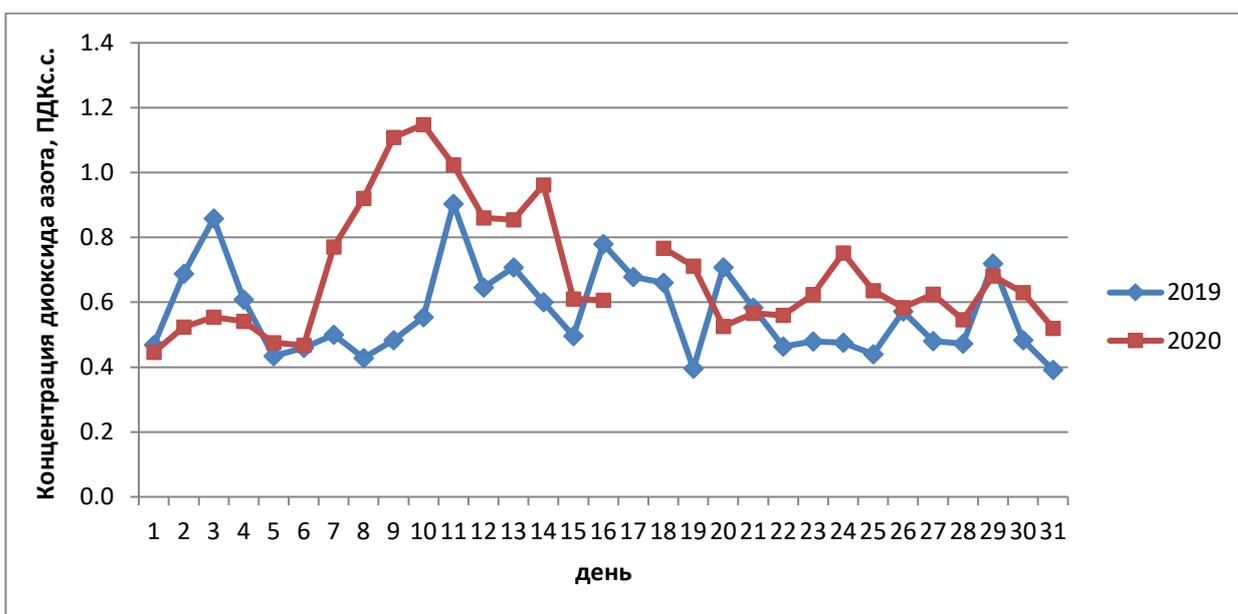


Рисунок 3.2.10 – Распределение концентрации диоксида азота в декабре 2019 и 2020 гг., ПДКс.с.

3.3 Приземная и приподнятая инверсия

Приземная инверсия является задерживающим слоем, это значит, что при сравнении одного месяца за два разных года накопление загрязняющих веществ будет больше тогда, когда случаев инверсии тоже будет больше.

В каждом месяце, где разница давлений была большой (февраль, апрель и декабрь), и в марте я просмотрела все случаи изотермии и приземной и приподнятой инверсий (таблица 3.3.1).

Таблица 3.3.1 – Общее количество случаев изотермии и приземной и приподнятой инверсии

	Февраль		Март		Апрель		Декабрь	
	2019	2020	2019	2020	2019	2020	2019	2020
Общее количество случаев изотермии и инверсии	32	14	23	21	23	15	33	38

В феврале, апреле рассматриваемые явления встречались чаще в 2019 г., чем в 2020 г., а значит и накопления взвешенных веществ в атмосфере были значительнее. В декабре наблюдалась прямо противоположная ситуация. В марте – общая сумма случаев почти одинакова, поэтому в этом месяце влияние инверсионных слоев будет в равной мере.

Рассмотрим отдельно случаи изотермии и инверсии по месяцам (рисунок 3.3.1). В феврале 2019 года встречалось большее количество случаев обоих явлений, поэтому накоплений загрязняющих частиц в этом месяце будет выше в 2019 году, чем в 2020 году. В марте инверсий было больше в 2019 году, а инверсий – в 2020 году, это означает, что накоплений в 2020 году все же наблюдалось чуть больше. В апреле случаев изотермии в 2019 году было на 3 меньше, чем в 2020 году, но инверсий, которые вносят большой вклад, как задерживающий слой, в значительной степени больше, а значит, накопления в этом месяце превышают в 2019 году. В декабре изотермия чаще наблюдалась в 2019 году, а инверсия – в 2020 году. Из выше сказанного можно сделать вывод, что в декабре 2020 года накопление взвешенных частиц в атмосфере будет больше, чем в декабре 2019 года.

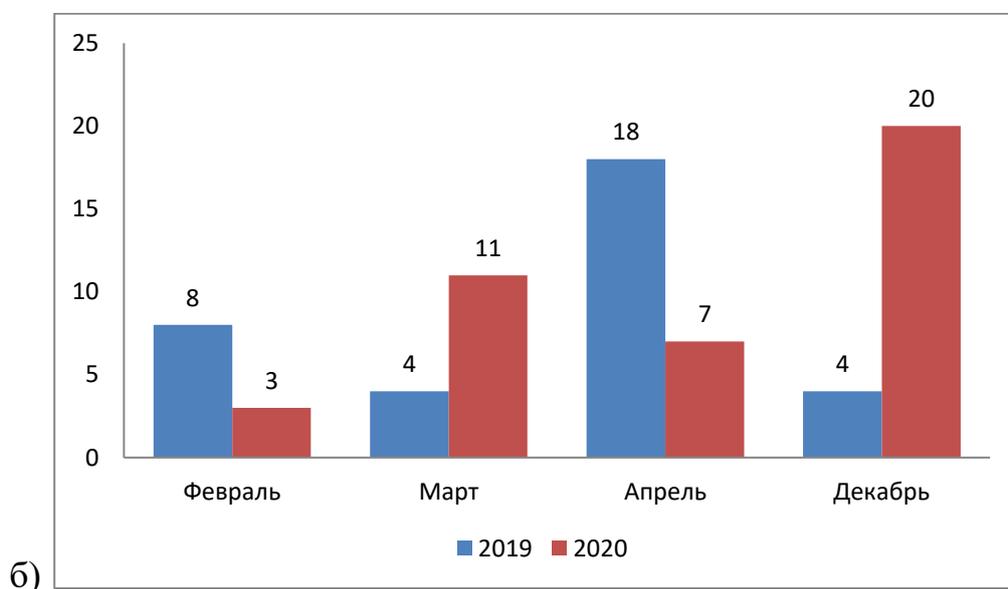
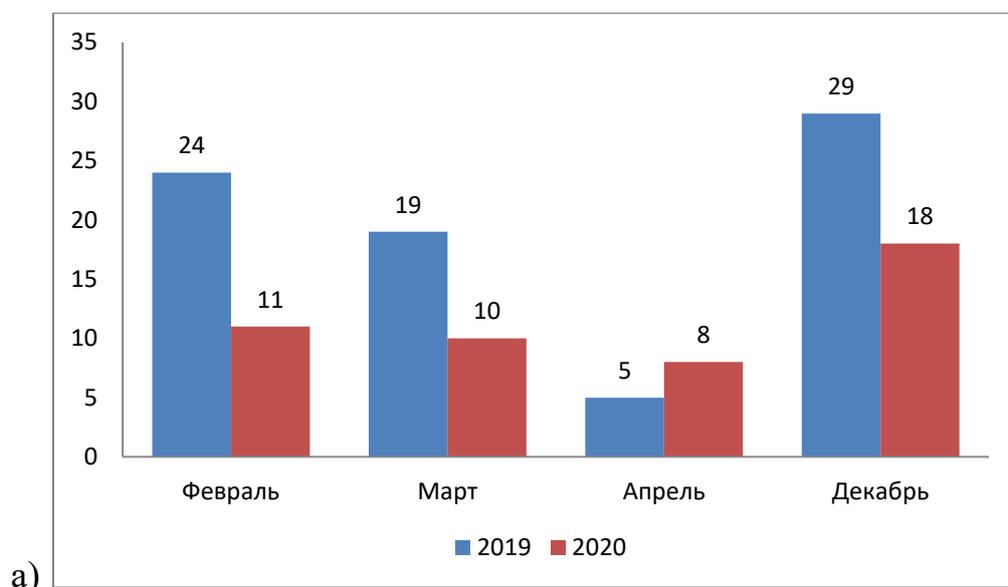


Рисунок 3.3.1 – Количество случаев изотермии (а) и приземной и приподнятой инверсий (б)

Температурная инверсия способствует большему накоплению взвешенных частиц в те месяца, когда это явление наблюдалось не только большее количество раз, но и продолжительнее и чаще в дневные сроки, так как основные выбросы в атмосферу происходят в дневные часы.

В феврале и апреле 2019 г. инверсия наблюдалась несколько сроков подряд (пример таких случаев представлен на рисунке 3.3.2 по месяцу

февраль) и отмечалась как в ночные сроки, так и в дневные. В эти месяцы в 2020 году такие случаи встречались реже (пример приведен по месяцу февраль на рисунке 3.3.3) и были в основном в ночные сроки. Прямо противоположная ситуация отмечается для марта и декабря.

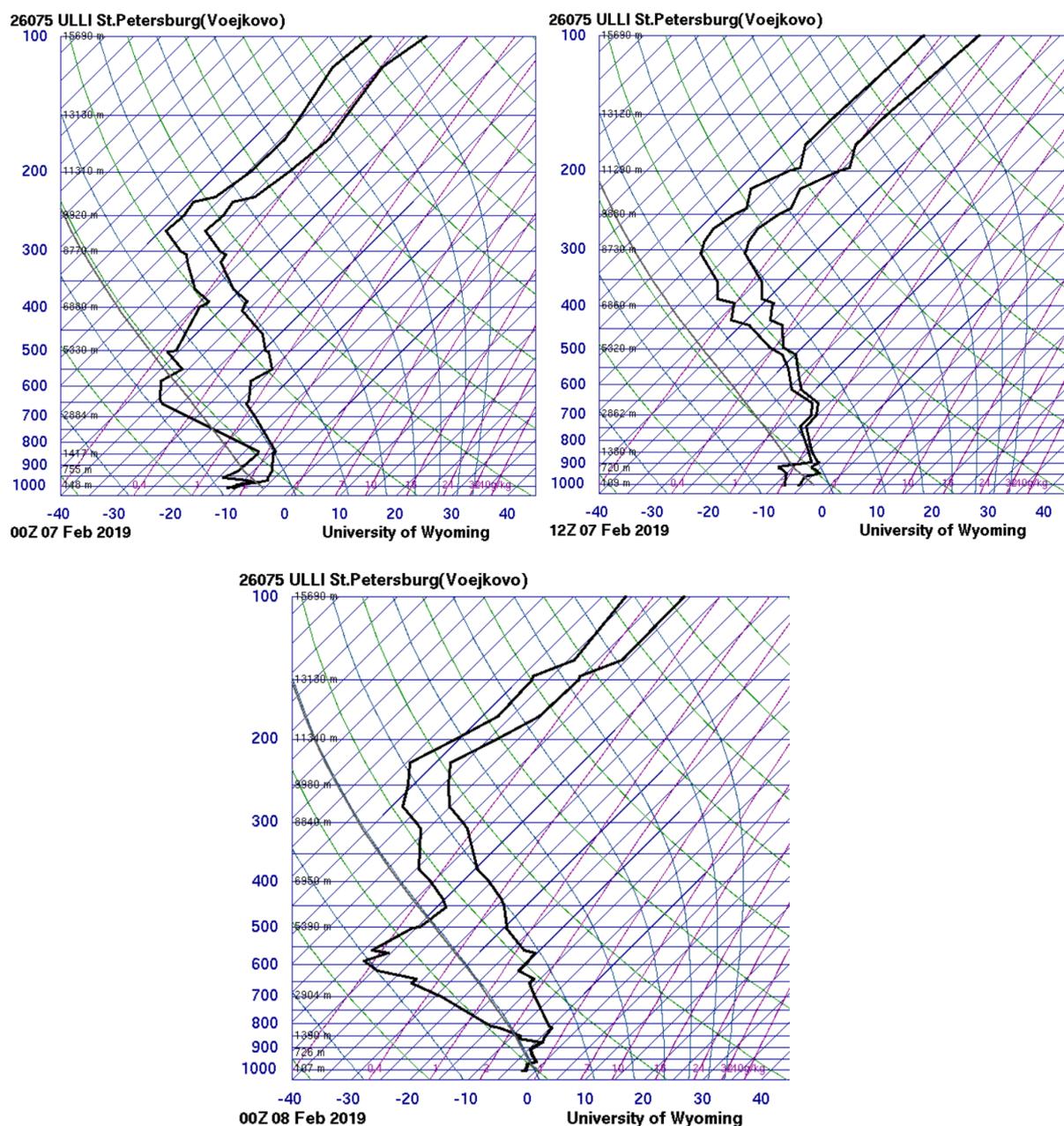


Рисунок 3.3.2 – Пример продолжительности инверсии 3 срока подряд – 00Z 07.02, 12Z 07.02, 00Z 08.02 в 2019 году

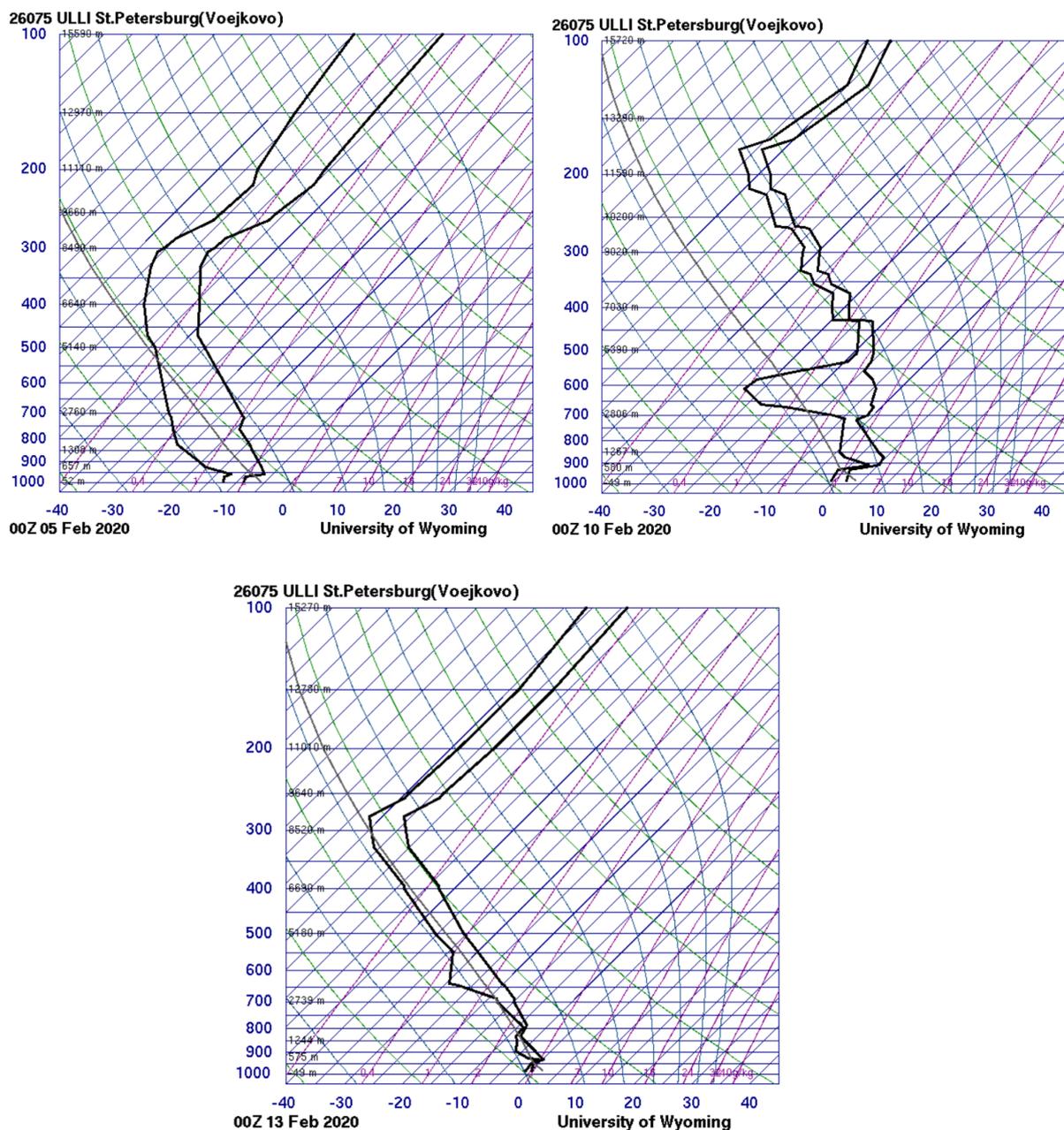


Рисунок 3.3.3 – Пример случаев повторяемости инверсии подряд – 00Z 05.02, 00Z 07.02, 00Z 13.02 в 2020 году

3.4 Осадки

Влажность имеет прямое влияние на количество аэрозолей в воздухе. При повышенном количестве водяного пара в атмосфере большая часть частиц, например пыль, песок, оседают на землю. Это действие имеет

накопительный эффект, если высокая влажность наблюдается продолжительное время. Так если в одном месяце продолжительное время концентрация водяного пара в воздухе была высокой, то в следующем месяце взвешенных частиц будет отмечаться меньше в атмосфере, а значит, что воздух будет чище от загрязняющих веществ. Прямо противоположная ситуация будет наблюдаться если после засушливого месяца.

На рисунке 3.4.1 видно, что самым сухим месяцем в 2019 году был апрель, это значит, что в этот месяц аэрозоль оседал в малом количестве. А в последующем месяце – мае, в среднем выпадало 2,5 мм/день, из-за чего взвешенные частицы все же вымывались. Больше всего осадков наблюдалось в октябре и ноябре 3 мм/день, из чего следует, что в последние месяцы года шло вымывание.

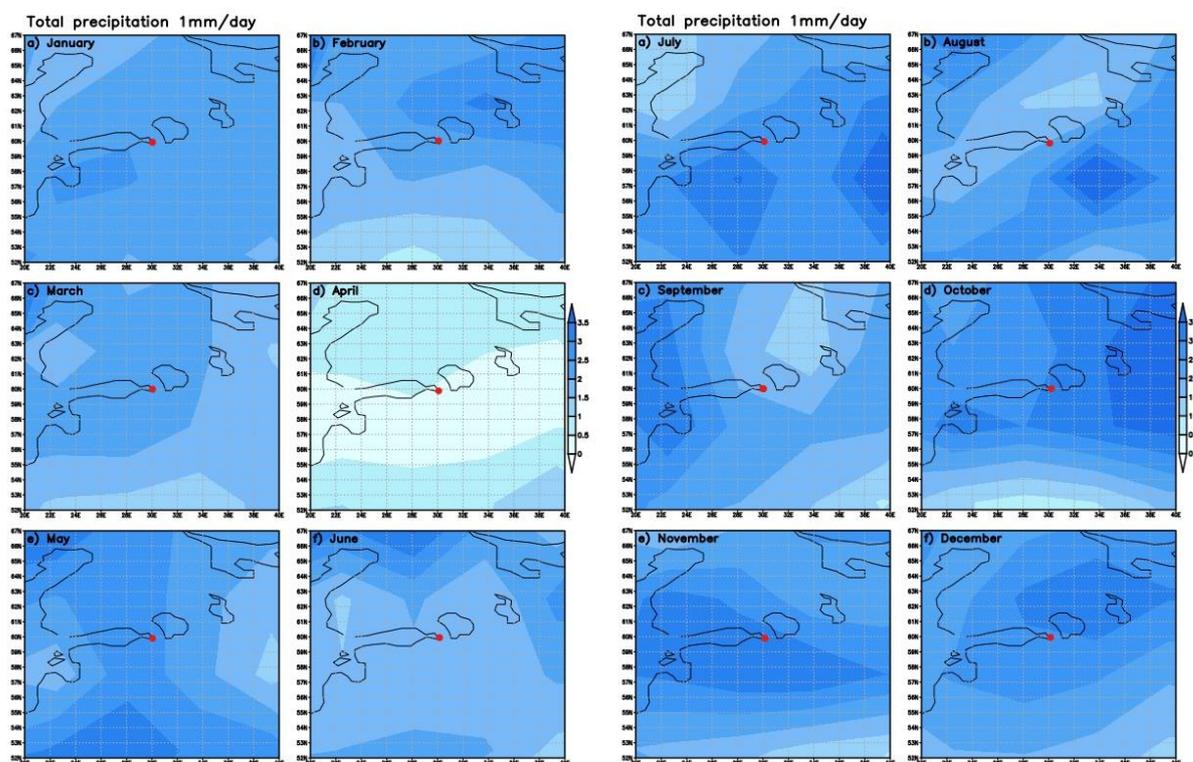


Рисунок 3.4.1 – Среднемесячное количество суммарных осадков в 2019 году, мм/день

На рисунке 3.4.2 видно, что засушливых месяцев не наблюдалось, минимальное количество осадков было в марте, апреле мае, августе и декабре 2 мм/день. Максимальное количество осадков было в июле – 3,5 мм/день. В этот месяц могло быть хорошее оседание и вымывание аэрозоля. Также в последующем месяце – августе, из-за оседания взвешенных веществ в июле тоже могло наблюдаться уменьшения частиц в атмосфере.

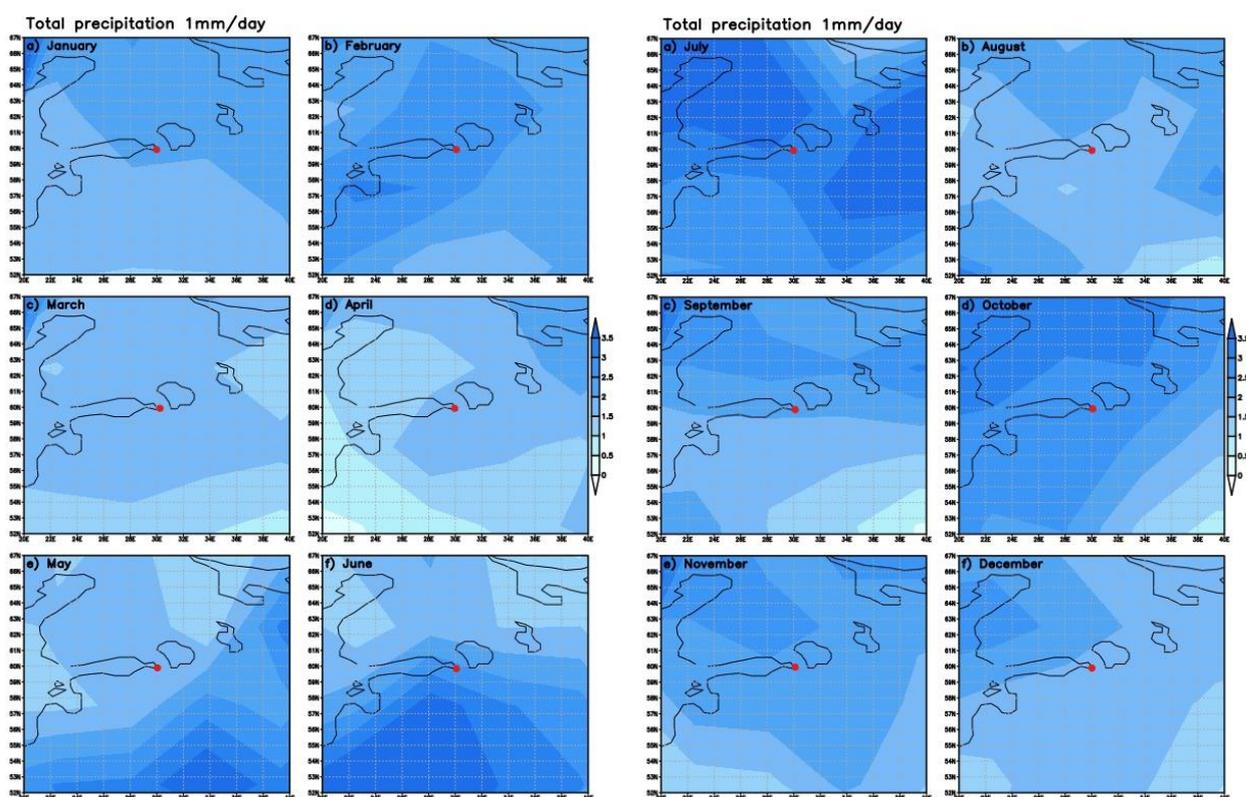


Рисунок 3.4.2 – Среднемесячное количество суммарных осадков в 2020 году, мм/день

Дальше рассмотрена разница осадков за каждый месяц (рисунок 3.4.3). Для ее получения значения 2019 года были вычтены из значений 2020 года. Этот параметр важно учитывать, так как осадки вымывают загрязнения из воздуха, а значит, чем больше осадков, тем меньше взвешенных частиц было в воздухе.

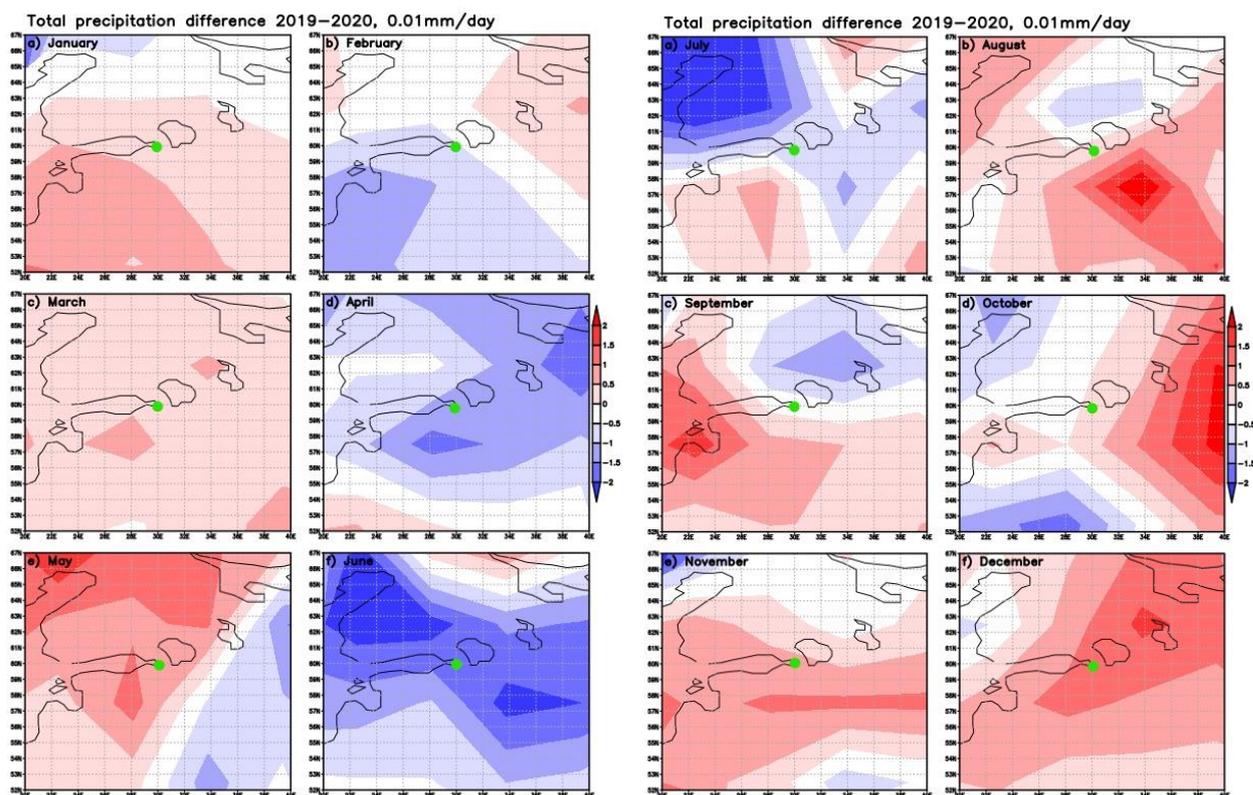


Рисунок 3.4.3 – Разница между количеством осадков между 2019 и 2020 гг.,
0,01 мм/в день

В мае, ноябре и декабре осадков выпало больше в 2019 году на 0,01 мм/день, 0,01 мм/день и 0,015мм/день соответственно. В апреле и июне – больше в 2020 году на 0,01мм/день и 0,015мм/день.

3.5 Перенос воздушных масс

Ветер осуществляет перенос воздушных масс, при оценке движения потоков можно оценить поступала ли какая-нибудь дополнительная нагрузка с соседних территорий.

Среднемесячные потоки для каждого года представлены на рисунке 3.5.1. Основной перенос идет с запада с Балтийского моря и Прибалтийских стран. Рассмотрим значительно различающиеся месяцы.

В апреле в 2019 году ветер был очень слабый, близок к штилю, в 2020 – преобладали сильные западные ветра. Из чего следует, что в 2019 году дополнительной нагрузки не приносилось воздушными потоками, но накопления аэрозолей из города не выдувалось. В 2020 году в прибалтийских странах был жесткий локдаун, где, как и в г. СПб, была приостановлена часть производств. Это значит, что дополнительная нагрузка в весенние месяцы отсюда не могла поступать.

В июне в 2019 году преобладали западные ветра, в 2020 – восточные.

В июле в 2019 году преобладали северные ветра, в 2020 – юго-западные.

Из рисунка 3.5.2 видно, что в южной и западной стороне Ленинградской области больше массовых производств, чем в северной и восточной. Таким образом, при малых скоростях ветра в апреле и при преобладающих западных ветрах в июне нагрузка от выбросов техногенных процессов была значительно больше в 2019 году, чем в 2020 году.

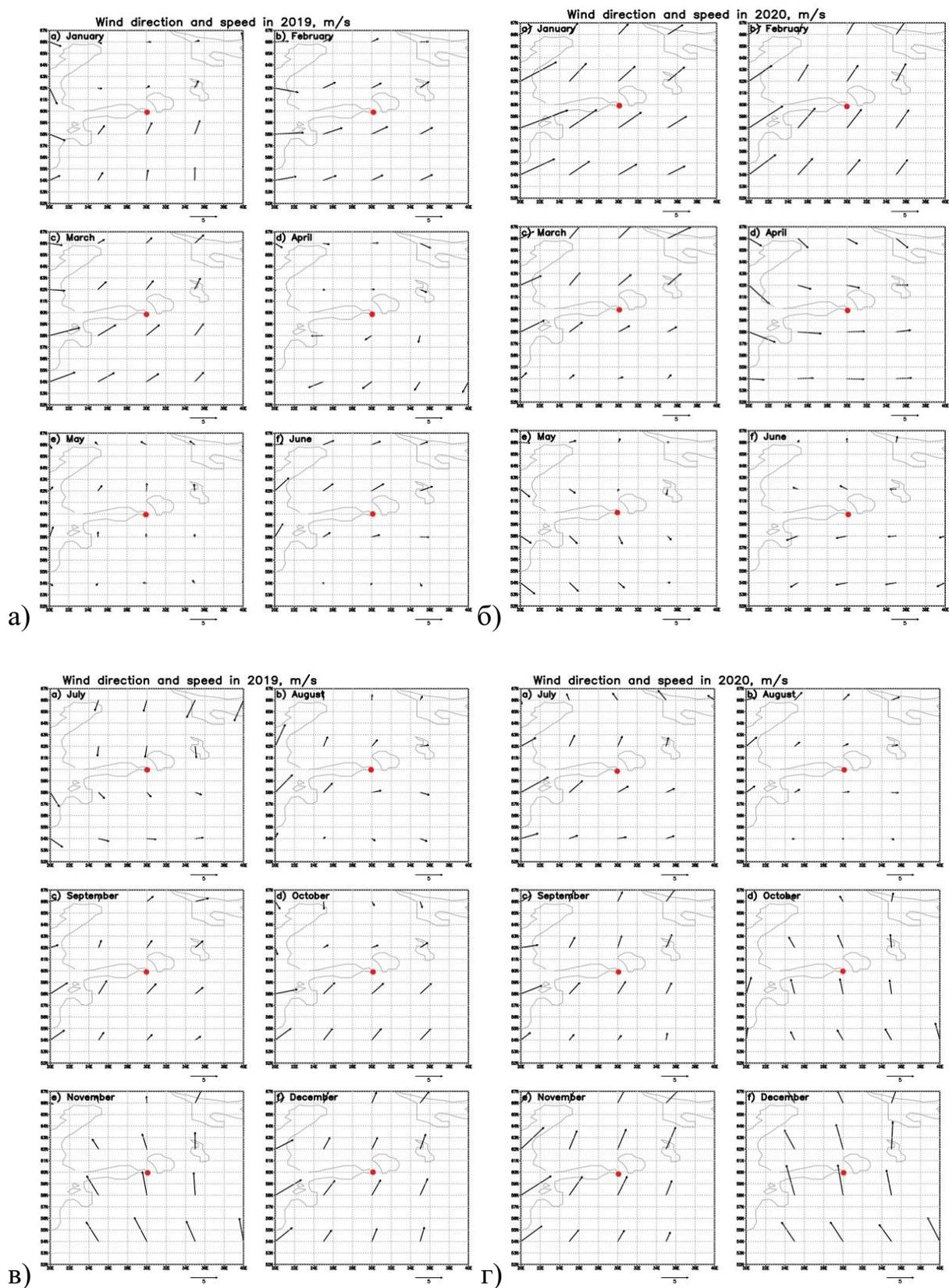


Рисунок 3.5.1 – Среднемесячные потоки воздушных масс, м/с

а) первая половина 2019 г.; б) первая половина 2020 г.; в) вторая половина 2019 г.; г) вторая половина 2020г.

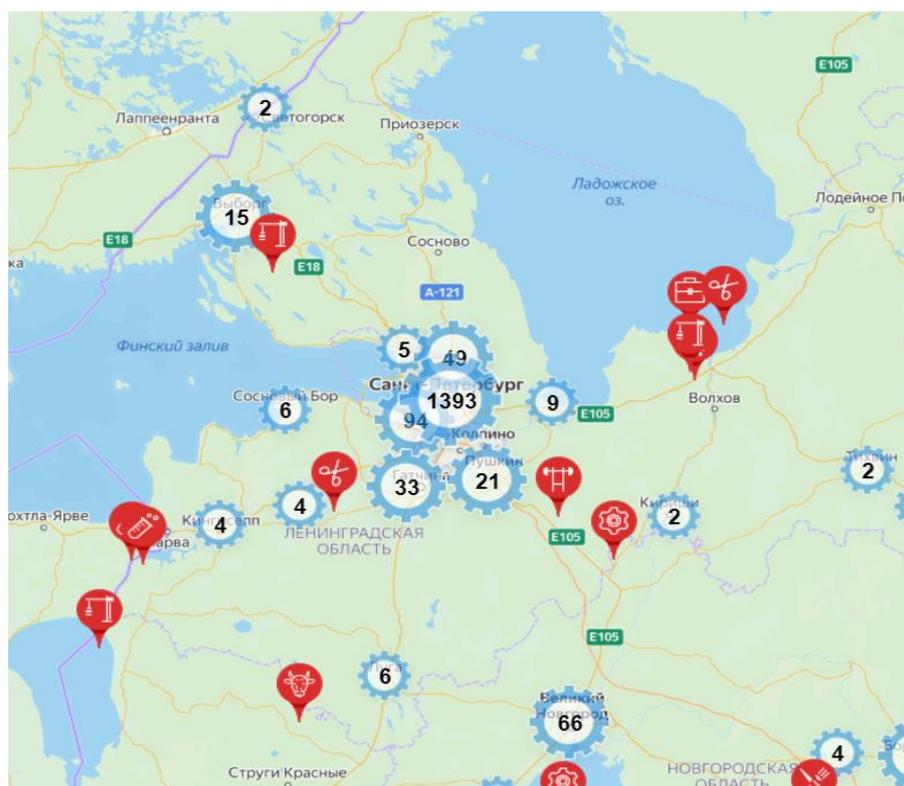


Рисунок 3.5.2 – Промышленная карта России 2022, на которой представлены промышленные предприятия, производства, фабрики, заводы, фермы. [32]

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате анализа влияния синоптической обстановки и метеорологических явлений, таких как приземная и приподнятая инверсия, выпавшие осадки и перенос воздушных масс, на количество аэрозоля в атмосфере в г. Санкт-Петербург в 2019 году и в 2020 году, весной которого произошло снижение антропогенной нагрузки в связи с карантинными мерами для сдерживания эпидемии, были сделаны следующие выводы:

1. В 2019 году по сравнению с 2020 годом в феврале и апреле давление было значительно выше. В эти месяцы Санкт-Петербург чаще находился в гребне антициклона, в которых происходят нисходящие движения, а значит, увеличение концентрации загрязняющих веществ наблюдается у поверхности земли. В декабре 2020 г. среднемесячное давление было выше на 15 гПа относительно декабря 2019 г., в этом месяце в 2020 г. накопления взвешенных частиц отмечаются больше на 3 ПДКс.с..
2. В феврале и апреле 2019 года и в декабре 2020 года случаи изотермии и инверсии в приземном слое встречались чаще и были продолжительнее. В марте – общая сумма случаев почти одинакова. Таким образом, погодные условия накопления взвешенных веществ в атмосфере относительно данного метеорологического явления 2019 году более благоприятные.
3. Относительно осадков в 2019 году можно выделить следующие месяцы – май, ноябрь и декабрь, где значения с 2020 годом различались на 0,01 мм/день, 0,01 мм/день и 0,015 мм/день соответственно, в 2020 году – апрель (0,01 мм/день) и июнь (0,015 мм/день). Это значит, что в эти месяца вымывание взвешенных

частиц в атмосфере происходило интенсивнее. Следовательно, вымывание аэрозоля наблюдалось активнее в 2019 году.

4. Основной перенос идет с запада с Балтийского моря и Прибалтийских стран. Изменение направления ветрового потока наблюдается в апреле: в 2019 году ветра были слабые, в 2020 г. – сильные западные, в июне: в 2019 году преобладали западные ветра, в 2020 году – восточные, и в июле: в 2019 году преобладали северные ветра, в 2020 году – юго-западные. При западных ветрах в июне и штилевом ветре в апреле нагрузка от выбросов техногенных процессов была значительнее в 2019 году.
5. В 2020 году выбросов загрязняющих веществ в атмосферу наблюдалось больше, чем в 2019 году. По рассмотренным синоптическим ситуациям и метеорологическим параметрам 2019 год был наиболее благоприятен для накопления взвешенных веществ в атмосфере. Одна из причин, по которой число аэрозолей превысило в 2020 году – увеличение в 2020 году количества объектов, имеющих выбросы загрязняющих веществ, на 175 единиц и источников выбросов вредных веществ в окружающую среду в 1,1 раз. Также можно сделать вывод, что карантинные меры повлияли больше в негативную сторону, из-за того что, предприятия были вынуждены нагонять производство для выполнения плана после выхода с локдауна.

Список используемой литературы

1. IPCC, 2007, Forster et al., "Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing", In: Climate change 2007: The Physical Science Basis, contributions of Working Group 1 to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, UK, New York, NY .
2. Ramanathan, V. , Ramana, M. , Roberts, G., Kim, D., Corrigan, C., Cheng, C., Winkler, D., Nature, 2007, 448, 575-578.
3. Christner, B., Morris, C., Foreman, C., Cai, R., Sands, D., Science, 2008, 319, 1214.
4. Ghan J., Schwartz, S.E., 2007, Aerosol properties and processes - A path from field and laboratory measurements to global climate models, Bull. Amer. Meteor. Soc. 1059-1083, doi: 10.1175/BAMS-88-7-1059.
5. Hinds W.C., 1999, Aerosol Technology: Properties, Behavior, and Measurement of Airborne Particles, 2nd ed, Wiley, New York.
6. Raghava R. Kommalapati. Atmospheric Aerosols and Their Importance / Raghava R. Kommalapati and Kalliat T. Valsaraj. - ACS Symposium Series; American Chemical Society: Washington, DC, 2009. – 10.
7. Райст П. Аэрозоли. Введение в теорию: Пер. с англ. – М.: Мир, 1987. – 280 с.
8. Беспмятников Г.П. Предельно допустимые концентрации вредных веществ в воздухе или воде. Л., Химия, 1975. – 456 с.
9. Голдовская Л.Ф. Химия окружающей среды. М.: Мир; БИНОМ. Лаборатория знаний, 2007. – 295 с
10. Reto Gieré. Solid Particulate Matter in the Atmosphere / Reto Gieré and Xavier Querol // Elements, Vol. 6.- August 2010.- pp. 215-222 (DOI: 10.2113/gselements.6.4.215)

11. Donna Riordan. Air Quality Monitoring for Sulfur Dioxide in Metropolitan Adelaide / Donna Riordan and Farah Adeeb. - Environment Protection Authority, 2004. – 27.
12. Черных Н.А Краткий курс экологической химии. / Черных Н.А, Баева Ю.И.-Учеб. – М.: Мир науки, 2020. – Сетевое издание.
13. <https://ria.ru/20210305/koronavirus-1599707836.html> Дата обращения: 25.05.2022
14. https://www.gov.spb.ru/gov/otrasl/c_transport/news/186049/ - Официальный сайт Администрации Санкт-Петербурга. Дата обращения: 25.05.2022
15. <https://www.nokiantyres.ru/o-nokian-tyres/press-reliz/koncern-nokian-tyres-vremenno-ostanavlivaet-proizvodstvo-na-zavodah-v-ssha-i-rossii-dlya-zashity-ot-/> Дата обращения: 25.05.2022
16. <https://moika78.ru/news/2020-03-30/390020-karantin-perevel-promyshlennye-predpriyatiya-peterburga-na-novyj-rezhim-raboty/> Дата обращения: 25.05.2022
17. <https://www.interfax.ru/business/702477> Дата обращения: 25.05.2022
18. <http://www.meteo.nw.ru/articles/index.php?id=2> Дата обращения: 25.05.2022
19. Kalnay, E., and Coauthors, 1996: The NCEP/NCAR 40- Year Reanalysis Project. Bull. Amer. Meteor. Soc., 77, 437–471, doi:10.1175/1520-0477(1996)0772.0.CO;2.
20. Schubert, S. D., R. Rood, and J. Pfaendtner, 1993: An assimilated dataset for earth science applications. Bull. Amer. Meteor. Soc., 74, 2331–2342, doi:10.1175/1520-0477(1993)0742.0.CO;2.
21. Rienecker, M. M., and Coauthors, 2011: MERRA— NASA's Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications. J. Climate, 24, 3624–3648, doi:10.1175/JCLI-D-11-00015.1.
22. Gibson, J. K., P. Kållberg, S. M. Uppala, A. Nomura, A. Hernandez, and E. Serrano, 1997: ERA description. ERA-15 Rep. Series 1, 72 pp.

23. Uppala, S. M., and Coauthors, 2005: The ERA-40 Re- Analysis. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 131, 2961–3012, doi:10.1256/qj.04.176.
24. Dee, D. P., and Coauthors, 2011a: The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 137, 553–597, doi:10.1002/qj.828.
25. Onogi, K., and Coauthors, 2007: The JRA-25 Reanalysis. *J. Meteor. Soc. Japan*, 85, 369–432, doi:10.2151/jmsj.85.369.
26. Ebita, A., and Coauthors, 2011: The Japanese 55-year Reanalysis “JRA-55”: An interim report. *SOLA*, 7, 149–152, doi:10.2151/sola.2011-038.
27. D. P. Dee. Toward a Consistent Reanalysis of the Climate System / D. P. Dee, M. Balsameda, G. Balsamo, R. Engelen, A. J. Simmons, and J.-N. Thépaut // European Centre for Medium-Range Weather Forecasts. – 2014. – 1235–1248.
28. Kobayashi, S., Y. Ota, Y. Harada, A. Ebita, M. Moriya, H. Onoda, K. Onogi, H. Kamahori, C. Kobayashi, H. Endo, K. Miyaoka, and K. Takahashi, 2015: The JRA-55 Reanalysis: General Specifications and Basic Characteristics *J. Met. Soc. Jap.*, 93(1), 5-48 (DOI: 10.2151/jmsj.2015-001).
29. Egbert Boeker and Rienk van Grondelle (2000). *Environmental Physics* (2nd ed.). Wiley
30. Доклад об экологической ситуации в Санкт-Петербурге в 2019 году / Под редакцией Д.С. Беляева, И.А. Серебрицкого – Спб.: ООО «Типография Глори», 2020, 179 с.
31. Доклад об экологической ситуации в Санкт-Петербурге в 2020 году/ Под редакцией Д.С. Беляева, И.А. Серебрицкого – Ижевск.: ООО «ПРИНТ», 2021. - 253с.
32. Промышленная карта России. (Электронный ресурс). Режим доступа: <https://productcenter.ru/map>