



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

Кафедра экспериментальной физики атмосферы

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(бакалаврская работа)

На тему: «Повторяемость приземных инверсий по данным аэрологической
станции Воейково»

Исполнитель **Федорова Лада Владиславовна**
(фамилия, имя, отчество)

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

Крюкова Светлана Викторовна
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»
Заведующий кафедрой

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

Восканян Карина Левановна
(фамилия, имя, отчество)

«24» июня 2025 г.

Санкт-Петербург
2025

Содержание

Введение	3
1 Методы исследования атмосферы	6
1.1 Методы аэрологических исследований	6
2 Температурные инверсии	20
2.1 Классификация инверсий. Приземные инверсии	20
2.2 Инверсии в свободной атмосфере	22
2.3 Инверсии в антициклонах	24
2.4 Оценка воздействия приземных инверсий на качество прогнозирования метеорологических условий Санкт-Петербурга	26
2.5 Влияние температурных инверсий на другие сферы	28
3 Анализ инверсий	30
3.1 Статистический анализ мощности (ΔH) и интенсивности (ΔT) инверсий, выявление закономерностей	30
3.2 Исследование влияния сезонных вариаций и антропогенных факторов на повторяемость и характеристики приземных инверсий	34
3.2.1 Сезонная повторяемость приземных инверсий	34
3.2.2 Сезонные вариации приземных инверсий	35
3.2.3 Антропогенные факторы	37
3.3 Анализ антропогенного воздействия на атмосферу и показателей уровня загрязняющих веществ в Санкт-Петербурге	34
Заключение	49
Список используемых источников	51
ПРИЛОЖЕНИЕ А	53

Введение

В результате хозяйственной деятельности человека в атмосфере появляется большое количество загрязняющих веществ, что наиболее характерно для крупных городов. Резкое возрастание концентраций загрязняющих веществ происходит в период возникновения неблагоприятных метеорологических условий, способствующих накоплению промышленных и автомобильных выбросов в нижних слоях атмосферы. К таким неблагоприятным условиям относится инверсия, представляющая собой задерживающий слой теплого воздуха, который препятствует рассеиванию примесей по вертикали [1].

Изучение повторяемости приземных инверсий температуры атмосферы играет ключевую роль в современных метеорологических и климатических исследованиях. Эти инверсии оказывают значительное влияние на формирование локальных климатических условий, воздействуя на распределение температуры, влажности и других важнейших метеорологических параметров [7]. Процесс приземной инверсии, при котором температура воздуха увеличивается с высотой, создает барьер для вертикального обмена, что, в свою очередь, приводит к скоплению загрязняющих веществ в нижних слоях атмосферы. Это влияние инверсий становится особенно актуальным в условиях нарастающей урбанизации и увеличивающихся промышленных выбросов, поскольку они в значительной степени определяют качество воздуха и оказывают влияние на здоровье населения.

Аэрологическая станция Воейково, расположенная в непосредственной близости от Санкт-Петербурга, предоставляет чрезвычайно важные данные о состоянии атмосферы в одном из самых динамично развивающихся регионов России. Эти данные дают возможность не только научно исследовать приземные инверсии, но и учитывать локальные климатические и

антропогенные особенности. Таким образом, получение и анализ этих данных необходимо для прогнозирования и смягчения негативных последствий, таких как ухудшение экологической ситуации и влияние на здоровье населения региона.

Основной целью данного исследования является анализ повторяемости приземных инверсий температуры атмосферы на основе данных аэрологической станции Воейково [6]. Исследование ставит перед собой задачу изучения характеристик этих инверсий с учетом сезонных изменений и антропогенного воздействия [16].

Для достижения поставленной цели необходимо выполнить следующие задачи:

- Сформировать архив данных о приземных инверсиях температуры атмосферы, зарегистрированных на аэрологической станции Воейково;
- оценить повторяемость инверсий температуры для различных сезонов и временных интервалов;
- выделить особенности температурных инверсий над территорией г. Санкт-Петербурга. Сопоставить полученные данные с уровнем загрязнения атмосферы г. Санкт-Петербурга.

Объектами исследования являются данные о приземных инверсиях атмосферы по данным аэрологической станции Воейково, а также содержание вредных веществ (оксида азота, диоксида азота, диоксида серы, оксида углерода) в атмосфере.

Предметом исследования является зависимость инверсий температуры от сезонности и антропогенного влияния на атмосферу.

Работа состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы и 3 приложений. Объем основного текста выпускной квалификационной работы составляет 44 страницы, включая 17 рисунков, 3 таблицы. Список литературы насчитывает 23 наименований.

Данная работа приобретает особую ценность в контексте возможности

получения новых знаний о влиянии приземных инверсий на локальный климат, а также влияние антропогенного воздействия на сами инверсии. Кроме того, она предоставляет возможность улучшить экологическую ситуацию путем прогнозирования возникновения инверсий и смягчения их последствий, что является крайне актуальным для сохранения здоровья населения и улучшения качества жизни в регионе.

1 Методы исследования атмосферы

1.1 Методы аэрологических исследований

Исследование вертикальной структуры атмосферы началось задолго до появления орбитальных платформ, и по-прежнему остаётся дисциплиной, в которой классические эксперименты соседствуют с передовыми цифровыми технологиями [4]. Первые попытки поднять измерительную аппаратуру на заметную высоту предпринимали естествоиспытатели XIX века: они использовали беспилотные воздушные шары, привязанные к земле длинными канатами, и примитивные барометры. Через полтора столетия технический арсенал усложнился до такой степени, что инженер-аэролог вынужден размышлять не о том, каким способом отправить прибор вверх, а о том, какая комбинация способов даст наилучшее отношение затрат к полезной информации. Однако фундаментальная идея – получить непрерывный вертикальный ряд данных о состоянии воздуха – остаётся неизменной. В этом тексте мы детально проследим эволюцию трёх основных подходов, проанализируем их сильные и слабые стороны и покажем, почему в реальных проектах они часто работают вместе, а не друг против друга.

Начнём с того, что принято называть визуально-шаропилотным наблюдением. На первый взгляд оно кажется анахронизмом, почти музейным экспонатом, однако его стойкость заслуживает уважения. Лёгкая латексная оболочка, наполненная гелием или водородом, поднимается с постоянной скоростью, заданной балансом подъёмной силы и аэродинамического сопротивления [10]. На земле оператор ведёт шар с помощью теодолита или цифрового оптического трекера, фиксируя угловое положение через короткие интервалы. Если скорость подъёма известна, остаётся тригонометрически вычислить высоту и кинематически – горизонтальную составляющую ветрового поля. В простейшем исполнении приборный парк ограничивается одним телескопом, штативом и секундомером, поэтому метод легко применять

в экспедициях, где каждая лишняя килограмма и ватт-час на счету. Его выбирают антарктические команды, полевые лагеря геологов, а также военные метеоконанды перед стартом ракет, поскольку система готова к работе через считанные минуты после развертывания. Слабое место тоже очевидно: человеческий глаз теряет шар задолго до того, как тот покинет тропопаузу, поэтому вертикальный охват ограничен нижними десятью-двенадцатью километрами. К тому же туман, осадки и ночное время сводят на нет оптическое сопровождение.

Эти ограничения подтолкнули инженеров перейти к радиотехническому сопровождению летящего объекта [16]. Вариантов несколько: можно использовать классический сантиметровый радиолокатор, который отражённым импульсом измеряет дальность до шара и его азимут, или установить на оболочке миниатюрный передатчик, а на земле принять сигнал двумя пеленгаторами, определив угол места по фазовой разности [7]. Общий знаменатель один – визуальное наблюдение больше не требуется, значит эксперименты можно проводить в густой облачности, за густой дымкой и ночью. Временное разрешение возрастает на порядок, а погрешность координат сокращается с сотен до единиц метров. Для оперативных синоптиков это означает возможность буквально в реальном времени уточнять траекторию атмосферных фронтов и оценивать турбулентность в слоях, где планируется полёт авиации. Радиотехническая схема потребляет больше энергии и требует квалифицированного персонала для обслуживания аппаратуры, но эта цена оправдана, когда речь идёт о критической инфраструктуре: космодроме, крупном аэропорту, офшорной буровой платформе. Практика показала, что именно такие объекты чаще всего финансируют круглогодичные радиолокационные станции, привязанные к штатным графикам зондировок.

Следующим логичным шагом стал радиозонд – по сути мини-лаборатория, поднимаемая тем же латексным шаром, но лишённая необходимости в наземном радаре. На борту радиозонда расположен барометр,

термогигрометр комбинированного типа, GPS-приёмник и маломощный передатчик [2]. Пока устройство поднимается, оно каждую секунду транслирует поток измерений, и тут же, в пункте приёма, формируется полноценный вертикальный профиль давления, температуры, относительной влажности и ветра. Международная организация – Всемирная метеорологическая – разработала регламент, согласно которому более тысячи станций по всему миру запускают радиозонды одновременно [4]: практика базируется на 0 и 12 UTC, чтобы прогнозные модели получили согласованные поля начальных условий. Несмотря на кажущуюся «дедушкой» среди цифровых сенсоров, радиозонд удерживает статус золотого стандарта по одной простой причине – он обеспечивает совместимую во времени и пространстве информацию. Спутниковые радиозонд-приёмники пока не демонстрируют такой же вертикальной детализации, а наземные лидар-системы, какими бы совершенными они ни были, остаются локальными по охвату и требуют калибровки именно на радиозондовые данные.

Однако сама мысль о том, что для одномоментного среза атмосферы нужно физически запускать одноразовые датчики, стимулировала поиски полностью дистанционных методик. Так родились лазерные и акустические локаторы. Доплеровский лидар отправляет нанесённый на импульс лазера излучение в атмосферу и принимает сигнал, рассеянный аэрозольными частицами. По сдвигу частоты вычисляется скорость частиц вдоль луча, а изменяя угол сканирования, оператор получает трёхмерное поле ветра до высоты пятнадцати — двадцати километров. Диальные схемы с двумя длинами волны дополнительно дают профиль водяного пара. Подобные комплексы уже работают на исследовательских судах в Северной Атлантике, где частая смена погоды делает традиционные запуски затруднительными, а каждое лишнее отверстие в палубе – потенциальной угрозой безопасности.

В последние пять-семь лет к лидару добавился ещё один игрок – беспилотный летательный аппарат, чаще всего мультикоптер с фиксированной

схемой винтов. Он способен поднять миниатюрный зонд на три-пять километров за считанные минуты, зависнуть на нужном эшелоне и вернуть прибор на площадку, сохранив его для следующего рейса. Так мы получаем экономию на одноразовых оболочках и возможностью многократно измерять конкретный слой, что особенно востребовано в городских исследованиях качества воздуха. В мегаполисах турбулентный обмен между улицами-каньонами и свободной атмосферой часто недооценивается, и именно дрон даёт шанс уточнить эту тонкую динамику, не рискуя столкновениями с высотными кранами, как это было бы при запуске классического шара.

Существует мнение, будто космические платформы уже закрывают потребность в наземных наблюдениях [4]. На практике радиозонды и их аналоги остаются необходимыми не только для валидации спутниковых продуктов, но и для точечной диагностики, когда надо принять решение в течении минут, а орбитальный надир пролетит над районом лишь через несколько часов. Спутниковый радиометр, основанный на микроволновых каналах, видит планету целиком, однако вертикальная разрешающая способность составляет несколько километров [1], и многие мезомасштабные явления просто размываются. Мы с коллегами однажды анализировали случай грозового вихря над низовьями Амазонки: только совмещение радиозондовых данных с проходом инструмента SAPHIR на борту индийского спутника позволило отделить реальное тёплое ядро от эффектов лучевой усреднённости.

Когда речь заходит о выборе инструментария для проточного проекта, всегда задают один и тот же вопрос – можно ли обойтись чем-то одним, чтобы сократить бюджет [12]. Ответ как правило отрицательный. Если объект исследования ограничен нижней границей тропосферы, например мониторинг приземного смога в индустриальном районе, то дрон и наземный оптический трекер составят эффективный дуэт. Если же задача – прогнозировать штормовое перераспределение массы воздуха над акваторией, избежать радиолокаторов и одноразовых зонтов не получится. Более того, современная

численная система данных реального времени Assimilation System настроена на многоканальное слияние источников: модель буквально «ожидает» поступления разных форматов, чтобы благодаря статистической интерполяции снизить суммарную ошибку. Мы однажды провели численный эксперимент, удалив из цикла данные GPS-зондов. Уже через шесть часов прогноз ветра на эшелоне семь с половиной километров систематически отклонялся на пять метров в секунду, что для гражданской авиации равнозначно потере почти трети топлива на маршруте.

Наблюдая эволюцию методик, трудно не заметить, как повторяются одни и те же сценарии. Сначала появляется простой и дешёвый инструмент. Затем учёные обнаруживают его ограничения, инженеры добавляют электронику, дело дорожает, но растут точность и автономность [2]. На следующем витке высокие затраты порождают минимизацию, и на сцену выходят компактные решения, в свою очередь отодвигающие предыдущее поколение в нишевые сегменты. Шаропилот пережил уже два таких цикла и, судя по всему, переживёт третий [7]. Его спасают универсальность, уникальная портативность и фактическая независимость от внешней энергетической инфраструктуры. Даже в мире, где лидар комплектуют сверхпроводящим приёмником и квантовым таймером, найдётся место человеку с теодолитом под открытым небом, потому что именно он подстрахует сложную технику в критический момент, когда та, казалось бы, нужна больше всего.

Стоит подчеркнуть ещё один аспект, редко обсуждаемый в методических руководствах. Как только данные покидают прибор, они проходят цепочку цифровых преобразований: фильтрацию, коррекцию сдвига гироскопов, алгоритмическое удаление выбросов. Каждая ступень, если она не подкреплена параллельными измерениями, неминуемо вносит субъективизм программиста. Например, процедура сглаживания лазерного профиля предполагает выбор аподизационного окна. Изменение окна с девяти до одиннадцати отсчётов смещает оценку максимальной скорости на проценты, и только независимый

радиозонд, запущенный в то же время, позволяет выявить систематический тренд. Вот почему глобальная аэрологическая сеть учреждала стандартизированные двойные запуски: на станциях сопоставления выпускаются два зонда с интервалом пять минут. Мы привыкли воспринимать это как дублирование на случай отказа, но по сути создаём инструмент объективного контроля качества.

Таким образом, несмотря на разнообразие технологий, ни одна из них не в состоянии полностью заменить остальные [12]. Вместо конкуренции мы наблюдаем синергетический эффект: каждый инструмент вносит свой вклад в общую картину, а именно совокупность разновозрастных измерений даёт исследователю уверенность в выводах. Поэтому правильный вопрос звучит иначе – каков оптимальный баланс инструментов для конкретной задачи и конкретного бюджета [2]. Ответ формируется в полевых условиях, где учёный сталкивается с ветром, дождём, интервалами спутниковых проходов и банальным отсутствием розеток. Опыт подсказывает, что именно на этой стадии теория растворяется в реальности, а инструменты, казавшиеся несовместимыми, складываются в живую систему, обслуживаемую людьми и призванную понять воздух над нашими головами. Сезонная повторяемость представлена в таблице 1.

Таблица 1- Сезонная повторяемость приземных инверсий

Задача	Приоритетный метод	Комментарий
Суточный прогноз погоды, уточнение моделей	Радиозонд + радиовеетровое сопровождение	Даёт полный термодинамический профиль и ветер
Экспресс-оценка ветра на площадке запуска	Шаропилотное наблюдение	Требует минимум оборудования, запуск за 15 мин
Мониторинг верхней тропосферы для авиации	Радиолокационный трекер	Высокая точность при сильных струях
Исследование микроклимата городского каньона	Беспилотные лидара и дроны	Позволяют безопасно работать ниже 500 м

Оценивать, как именно примеси перемещаются в приземном слое, на удивление сложно, и не только потому, что любое движение воздуха

подчиняется закону сохранения импульса [9]. Мы имеем дело с системой, в которой скромная локальная аномалия температуры, неуловимая глазу, может за считанные минуты изменить направление потоков, а лёгкое изменение влажности превратить возникающий конвективный вихрь в устойчивое поднятие. Поэтому самые точные методики, основанные на вычислительной гидрогазодинамике, мы сознательно перенесём во вторую главу. Там появится развернутое изложение того, как численные схемы высокого порядка отслеживают концентрацию диоксида серы или частиц $PM_{2.5}$, каким способом решаются уравнения Навье–Стокса с учётом турбулентной вязкости и почему сетка Эйлера вблизи подстилающей поверхности должна быть особенно мелкой. Сейчас же важно подчеркнуть: без точных наблюдений ни одна модель не превратится в надёжный инструмент. Наука об атмосфере уже давно получила в своё распоряжение не только классические метеозонды, но и целый парк дистанционных датчиков, которые фактически открывают «рентгенографию» пограничного слоя.

В современной аэрологии старый добрый наполненный водородом или гелием шар по-прежнему незаменим, когда требуется измерить температуру, влажность и давление с разрешением в сотни метров [7], однако этого больше недостаточно. Над крупными аэропортами дрейфуют лида-рамы, излучающие импульсы лазера и считывающие рассеянный сигнал от аэрозоля. Они дают высотный профиль плотности частиц с точностью, которая ещё десять лет назад казалась невозможной. Над промышленными агломерациями всё чаще слышно характерное потрескивание содаров — акустических локаторов, фиксирующих градиенты температуры по изменению звукового рассеяния. Если к этой связке добавить инфракрасные спектрометры, получим гибридную сеть, способную почти в реальном времени показывать, где интенсивность турбулентного обмена падает, а следовательно, там могут скапливаться загрязнения. Синергия-эффект проявляется в том, что мы уверенно перекрываем масштабные интервалы: от десятых долей метра, где струя

выхлопного газа ещё теплее окружающей среды, до десятков километров, где фронт превращается в глобальную волну. Разработчики оперативных прогнозов погоды благодаря этому набору наблюдательных средств верифицируют новую версию алгоритма ассимиляции данных, а климатологи выверяют те самые микрофизические параметры, которые незаметно меняют энергию всей планетарной системы.

На этом фоне неизбежно возникает вопрос о температурной инверсии, то есть об участках атмосферы, в которых вертикальный градиент температуры неожиданно меняет знак [1]. По-русски такая зона звучит вполне буднично, а между тем именно она способна блокировать подъём воздуха, подавлять смешение и тем самым удерживать над городом колпак из газа и аэрозоля. Сам феномен часто описывают как результат «перестановки» — буквальный перевод латинского *inversion*, однако научная суть глубже. В типичном дневном слое температура убывает примерно на шесть с половиной градусов на километр, что принято считать нормальным стратифицированным состоянием. Если же вечерняя поверхность почвы быстро теряет тепло из-за радиационного охлаждения, над ней формируется тонкая прослойка более холодного воздуха, и уже после нескольких десятков минут внизу оказывается холоднее, чем в полусотне метров выше [17]. Перед нами приземная инверсия. Тот же эффект может возникнуть, когда тёплый воздушный объём проскальзывает над холодным землёй или холодным водоёмом, создавая приподнятый инверсионный потолок.

Опытный синоптик различает инверсию и изотермию сразу на термограмме радиозонда: если на графике видно ровное горизонтальное плато градусной кривой, значит температура не меняется с высотой и вертикальный градиент практически нулевой. С точки зрения прогноза погоды это различие принципиально, но для процессов переноса примесей — *marginal*: течение столь же стабилизировано, а вертикальное перемешивание подавлено. Показательно, что определяющее влияние инверсий на погоду и экологию

отмечали ещё создатели первых аэрологических станций в начале двадцатого века, когда Норвежская школа синоптиков только формировала понятийный аппарат фронтологии. Сейчас, спустя столетие, мы располагаем не только статистикой, но и тонкими физическими объяснениями, от электронного энергетического баланса атмосферы до параметризации кatabатических ветров в численных схемах.

Инверсионные слои формируются под действием двух главных категорий факторов, которые условно можно назвать радиационными и адвективными, хотя в реальном мире они редко существуют по отдельности [10]. Холодная ясная ночь над равнинной территорией — типичный радиационный сценарий, потому что поверхность, избавляясь от накопленного днём тепла, охлаждает лежащий вплотную объём воздуха. Как только скорость ветра опускается ниже порога механической турбулентности, подъём прогретого воздуха прекращается, и градиент lapse-rate тут же обнуляется. Стоит появиться лёгкому ветерку или растянуться тонкому перистому облаку, эффект будет разрушен, потому что перемешивание вернёт квазилинейное убывание температуры [1]. Адвективная природа чаще проявляется ранней весной, когда с юго-запада вгрызается тёплый воздух, проскальзывает над остывающей ещё зябкой землёй, оставляя между слоем и поверхностью чужеродный температурный скачок. На побережьях, особенно вблизи крупных озёр, такие события происходят регулярно: морской бриз к полудню приносит более прохладный слой, который устлаётся вдоль линии берега и может держаться до заката. Не следует забывать и о том, как рельеф способствует локализации этих процессов. В межгорных котловинах или городских выработанных карьерах полурadiационное, полуадвективное охлаждение легко застопоривает воздух внизу, при этом каждое дополнительное здание лишь усиливает стратификацию, потому что увеличивает площадь излучающей поверхности.

Читатель, пожалуй, задастся вопросом, почему инверсия настолько важна для всех, кто имеет дело с качеством атмосферы [5]. Ответ очень прост. Если

слой воздуха у земли холоднее, чем над ним, а турбулентный обмен ослаблен, то любой выброс загрязнителя, будь то промышленная труба или транспортная магистраль, распространяется преимущественно горизонтально, почти не поднимаясь вверх. С этим связаны эпизоды смога, знаменитые не только лондонским декабрём сорок восьмого года, но и многими менее известными, но более частыми случаями в промышленных городах России, Таиланда или Китая. Именно поэтому экологи и синоптики внимательно следят за прогнозом стратификации: сильная инверсия вечером при малом ветре — верный индикатор повышенной концентрации оксида азота до вступления дневной конвекции. Любопытно наблюдать, как одно и то же явление, которое в низких широтах может обернуться опасной капсулой загрязнений, в полярных областях, наоборот, оказывается естественным барьером, сохраняющим стабильный ледяной покров за счёт подавления турбулентного теплообмена.

Чтобы систематизировать эмпирические сведения, исследователи выделяют несколько характеристик инверсий, которые уместно рассматривать в комплексе [17]. Прежде всего интересует толщина слоя или, иначе говоря, его мощность. Для приземных ситуаций она редко превышает сотню метров, но в исключительных случаях при снежном покрове может расти до трёхсот, что коренным образом меняет схему рассеивания загрязнителей. За мощностью следует показатель интенсивности, то есть прироста температуры между нижней и верхней границей. Чаще встречается пять-шесть градусов, однако по данным отдельных зимних кампаний фиксировались моменты, когда разница достигала пятнадцати, и тогда даже дым из невысокой котельной буквально сползал по склону, не поднимаясь выше второго этажа [8]. Третья величина — это высота основания для приподнятых инверсий, она критична, если нужно понять, куда ставить датчик наблюдательной сети. Если приборный комплекс находится ниже основания такого слоя, то он регистрирует один микроклимат, а здание обсерватории всего на сто метров выше — совершенно другой. Кроме того, обязательно учитывают продолжительность события. Есть ночные

«быстрые» инверсии, рубеж которых исчезает сразу после утреннего прогрева, но бывают и затяжные, держатся более суток, причём зимой за Полярным кругом рекордно стабильные слои сохраняются неделями. Наконец, статистики считают повторяемость, то есть долю инверсионных случаев за сезон или год. В сибирских степных районах, например, приземная инверсия практически каждое ясное зимнее утро, что видно по многолетней метео-хронике.

Любопытно заметить, что инверсии вовсе не ограничиваются нижней тропосферой, где мы живём и проводим наблюдения [9]. Одной из самых известных является тропопауза, разделяющая конвективную тропосферу и более стратифицированную стратосферу. На высоте десяти, а иногда восемнадцати километров в тропических широтах температурный градиент тоже меняет знак, правда, в тамошнем разреженном воздухе механизм удержания водяного пара отличается от привычного приземного случая. Ещё выше, примерно на тридцати пяти-сорока километрах, располагается стратопауза, а на границе мезосферы отмечается мезопауза. Каждый такой слой влияет на динамику планетарных волн, радиационный баланс и химические реакции, но в контексте дипломной работы мы удержим внимание на тех инверсиях, которые непосредственно связаны с качеством воздуха, то есть на поверхностных и низких приподнятых [5].

Когда речь идёт о приземной инверсии, человек прежде всего сталкивается с оптическими и акустическими эффектами. Свет, проходя через границу плотностей, искривляется, и восход солнца нередко наблюдают чуть раньше геометрического расчёта, потому что лучи огибают слой подобно волноводу. По той же причине в ясный морозный вечер можно услышать шум поезда за десятки километров, хотя летом эта волна давно бы рассеялась. С точки зрения радиотехники такое же явление обеспечивает так называемые каналы сверхдальнего распространения, которые военные инженеры учитывают при планировании связи. Научный интерес здесь двойкий. С одной стороны, атмосферная акустика всего лишь инструмент для диагностики, с

другой — она сама зависит от состояния инверсии и даёт косвенный способ оценить, насколько она прочна. Полагаю, многим будет интересно узнать, что один из первых практических прогнозов инверсии делался по кривой радиозатухания ночного сигнала на частоте сорок мегагерц, и метод работал удивительно точно.

Если мы обратимся к реальным числовым примерам, то увидим, что приземная инверсия над крупным мегаполисом средней полосы России формируется примерно в 60—70 процентах зимних ночей при ясном небе [5]. Средний прирост температуры за сто метров составляет около пяти градусов, что подтверждено данными московской башни Останкинского научного полигона и дубнинского комплекса ИТФ МИФИ. Наблюдается чёткая корреляция между скоростью ветра и мощностью слоя: при порывистом ветре шесть метров в секунду приземная инверсия либо не успевает установиться, либо оказывается крайне слабой. Иногда может показаться, что подобные детали уводят нас в сторону от основной тематики работы, но без понимания этих нюансов невозможно построить корректный сценарий «что-если» при оценке риска превышения предельно допустимой концентрации, скажем, бензола на уровне городского воздуха.

Раз уж мы упомянули наблюдательные сети, стоит сказать несколько слов о том, как именно измеряют инверсию [4]. Классический инструмент — радиозонд, однако запуск каждые полтора часа, как того требует высокое временное разрешение для валидации CFD, слишком дорог. На помощь приходит профилометрическая лида-станция, которая снимает вертикальный профиль аэрозоля раз в пару минут. Косвенный индикатор инверсии — пиковое накопление частиц на высоте двухсот метров в ночное время, которое исчезает на рассвете, едва начинает прогреваться поверхность. Здесь мы вновь возвращаемся к гибриднему подходу: радиосонды дают точную температуру, лида-профиль — распределение аэрозоля, содары — производную ветра. Комбинация этих источников информации позволяет уточнить параметризацию

обмена при расчёте дисперсии. Быть может, такое объяснение выглядит излишне подробным, однако именно оно демонстрирует, какую тонкую линию проводим между теорией и практикой, когда решаем, должен ли моделист менять условия на нижней границе или усилить схему SGS-турбулентности.

Близится момент, когда читатель, устав от потоков фактов, может подумать, не пора ли перейти к выводам. Думаю, здесь уместна своеобразная пауза, чтобы ещё раз осознать, насколько часто мы сталкиваемся с инверсиями в реальной жизни [9]. Тропопауза, которую пассажир самолёта пересекает почти на каждой трансконтинентальной линии. Стратопауза, чья динамика определяет распределение озона. Мезопауза, чьи редкие серебристые облака летом вызывают восторг наблюдателей. Каждый из этих слоёв является инверсией, только масштабы и последствия различны [10]. С этой точки зрения, инверсия — не аномалия, а фундаментальная морфологическая особенность атмосферы, и на поверхности мы видим лишь уменьшенную копию общепланетарного механизма.

Возвращаясь к прикладной стороне, можно сформулировать несколько практических акцентов, которые понадобятся во второй главе. Во-первых, сильная приземная инверсия почти неизбежно означает ухудшение качества воздуха в городских низинах, поэтому алгоритм раннего предупреждения о неблагоприятных метеоусловиях должен включать индикатор стратификации. Во-вторых, слой толщиной в пятьдесят метров, вернее, его граница, становится самостоятельным «зеркалом», отражающим акустические волны. В-третьих, интенсивность инверсии, измеренная простым датчиком температуры на пятом и пятидесятом метрах, даёт недорогой способ калибровать профили CFD без сложных радиозондов. Каждый из этих тезисов мы разовьём детально, подкрепив данными натурных экспериментов.

Таким образом, мы имеем следующий контур рассуждения. Температурная инверсия, как минимум в трёх физических проявлениях — радиационном, адвективном и орографическом — формирует скелет

стратификации пограничного слоя. От её наличия и характеристик напрямую зависит вертикальное перемешивание, а значит, и пространственно-временное распределение примесей. Учитывать это в расчётах дисперсии столь же важно, как и точность описания ветрового поля, потому что любые ошибки будут усиливаться на этапе нелинейного развития загрязняющего облака [12]. Поэтому в дальнейшей части работы мы подробно опишем, каким образом сетка наблюдений, собранная из зонтов, лидаров и содаров, ассимилируется в численную схему, и как параметры инверсии входят в модуль турбулентного замыкания. Наша цель — не просто перечислить факты, а показать живую взаимосвязь между тем, что фиксирует прибор, и тем, что выводит на экран прогностическая модель [4], а значит, сформировать надёжный научный фундамент для всех, кто займётся экологическим нормированием или задачами атмосферного проектирования инфраструктуры.

2 Температурные инверсии

2.1 Классификация инверсий. Приземные инверсии

Наиболее распространёнными инверсиями являются радиационные, представленные на рисунке 1. Образуются вблизи поверхности, когда она охлаждается в результате теплового излучения. От земной поверхности прилегающие слои воздуха тоже охлаждаются; из-за этого температура с высотой в слое воздуха будет расти, а не падать с высотой. Данные инверсии также развиваются, когда земная поверхность отдаёт тепла излучением больше, чем получает. Это происходит ночью и в течении суток зимой.

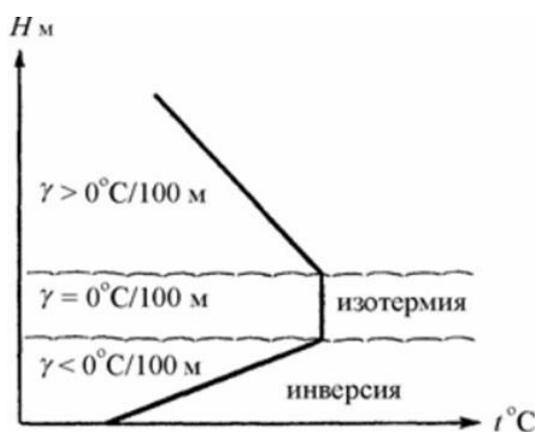


Рисунок 1 - Радиационная инверсия

Благоприятные условия для развития радиационных инверсий — это слабое движение воздуха, отсутствие облачности, наличие больших колебаний температур ото дня к ночи. Они характерны для всех районов, но почти постоянно радиационные инверсии встречаются в Арктике и Антарктиде.

1. Разновидностью радиационных инверсии являются орографические, представленные на рисунке 2, в которых радиационный эффект усилен особенностями орографии. В условиях холмистой местности воздух, который охлаждается стекает с возвышенностей в котловины или низины, где выхолаживание больше из-за ослабленного обмена.

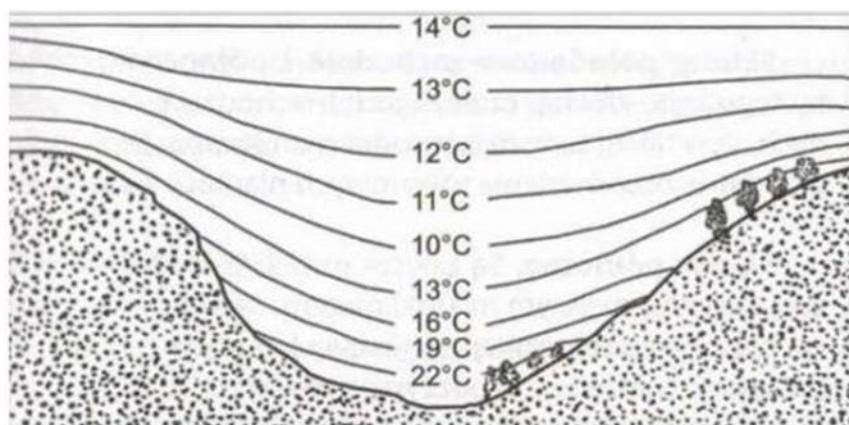


Рисунок 2 - Орографическая инверсия

Когда тёплые воздушные массы при адвективном переносе распространяются над более холодной подстилающей поверхностью, возникают инверсии тёплого воздуха. Нижние слои тёплого потока при этом отдают часть тепла подстилающей поверхности и в результате охлаждаются более сильнее, чем верхние.

Адвективные инверсии, представленные на рисунке 3, будут образовываться при перемещении тёплого воздуха по холодной подстилающей поверхности.

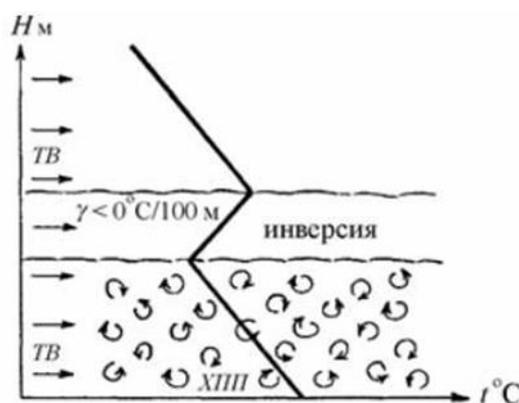


Рисунок 3- Адвективная инверсия

За счёт соприкосновения с холодной подстилающей поверхностью нижние слои воздуха охлаждаются, а за счёт адиабатического понижения температуры в поднимающемся воздухе и турбулентного перемешивания охлаждение переходит в более высокие слои. И температура с высотой в слое трения понижается. Турбулентность резко убывает, и наблюдается рост температуры с высотой, т.е. образуется слой инверсии. Чаще всего, образуются

в холодное время года [7].

С адвекцией тёплого воздуха, поступающего на снежный покров, также связаны снежные и весенние инверсии. Из-за затрат большего количества тепла, отдаваемого воздухом, на таяние снега, происходит развитие, обычно невеликих по мощности инверсий.

2.2 Инверсии в свободной атмосфере

1. На верхней границе слоя трения, на высоте нескольких сотен метров над земной поверхностью возникают инверсии трения, которые являются переходным типом от приземных инверсий к инверсиям в свободной атмосфере, представлены на рисунке 4.

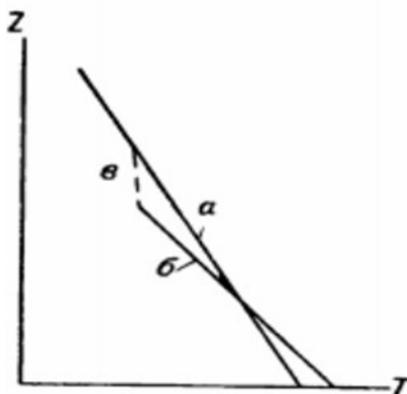


Рисунок 4- Схема образования инверсии трения

2. В свободной атмосфере в слоях с большими скоростями ветра развиваются динамические инверсии, представленные на рисунке 5. Быстро движущийся поток засасывает воздух из соседних слоёв с меньшими скоростями движения. Но при этом на верхней границе слоя увеличенных скоростей создаются нисходящие движения, а на нижней - восходящие. В зоне восходящих движений температура воздушных частиц адиабатически понижается, а в зоне с нисходящими повышается, и в результате происходит перераспределение температуры.

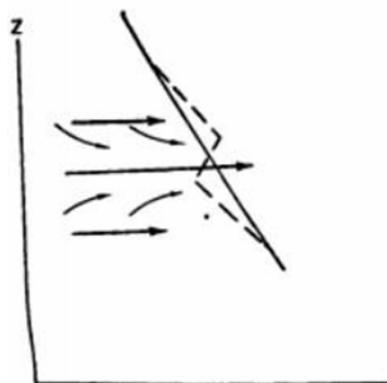


Рисунок 5- Схема образования динамической инверсии

Первоначальная линия стратификации, а заменяется другой, более сложной б; в средней части слоя больших скоростей возникает температурная инверсия.

3. Инверсия сжатия, или оседания, представляют наибольший интерес. В таких барических областях, наблюдается общее нисходящее движение в среднем слое тропосферы и растекании воздуха от центра к периферии в нижнем слое.

Инверсия сжатия отличаются большей вертикальной и горизонтальной протяжённостью. Развиваются они чаще всего на высотах 1 - 2 км, а зимой 10 иногда и ниже. Под инверсией часто появляется слои дымки, а в холодный период года нередко образуется туман и облака.

4. Фронтальные инверсии, представленные на рисунке 6, возникают во фронтальных зонах, когда тёплый воздух натекает на клин холодного. Из-за того, что при этом изолинии одинаковой температуры располагаются в теплом воздухе выше, чем в холодном смыкании их переходной зоне приводит к излому [8].

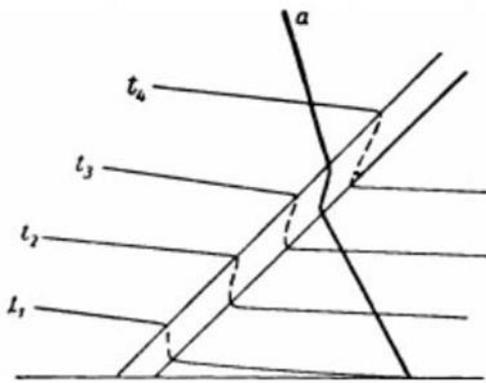


Рисунок 6- Фронтальная инверсия

2.3 Инверсии в антициклонах

Характерной особенностью в вертикальном распределении температуры воздуха в антициклонах является наличие инверсий. Выделяют радиационные инверсии, которые являются результатом выхолаживания нижних слоёв воздуха от подстилающей поверхности, а инверсии оседания - как результат нисходящих движений воздуха и динамического его нагревания в антициклоне. Преимущественно в ясные тихие ночи, особенно зимой образуются радиационные инверсии. Весенние и осенние заморозки чаще всего связаны с приземными инверсиями. Рельеф местности имеет большее

значение в образовании приземных инверсий. Холодный воздух стекает по неровностям рельефа и скапливается в котловинах, у подножия гор и на дне долин. Поэтому в горных районах инверсии более сильные и мощные, обуславливая неоднородное распределение туманов и заморозков.

При стабилизации внетропического антициклона оседание воздуха, которое связано с нижней дивергенцией может достигать величины 1 км за сутки. Между оседающим воздухом верхних слоёв и холодным воздухом нижних инверсии оседания имеют значительную мощность. Холодный подвижный антициклон становится тёплым стационарным. В устойчивых континентальных антициклонах к радиационным инверсиям присоединяются инверсии вышележащих слоёв - приземная инверсия может без разрыва

перейти и в целом составить несколько км по вертикали.

Под инверсиями оседания, которые покрывают больше районы, скапливаются частицы дыма, пыль и другие атмосферные частицы, переносимые снизу. Такие слои инверсий, называют задерживающими слоями атмосферы. Под инверсией будет образовываться высокий туман, который наблюдается как слоистые облака (St). Снижаясь, туман может достичь поверхности земли. При антициклональной погоде в горах с инверсиями у земли холодно и пасмурно, на высотах, над инверсиями - солнечно и ясно. В слое инверсии поднимающийся воздух быстро выравнивает свою температуру со средою, и его подъёмная сила пропадает. Появление кучевых облаков часто исключается существованием инверсий. Поэтому конвекция над сушей в хорошо развитых антициклонах, содержащих инверсии оседания, развивается редко. Облака, уже начавшие возникать, мало развиваются по вертикали, если инверсия лежит выше уровня конденсации. Но при большой скорости восходящих движений воздуха и мощности они могут пробиться сквозь инверсионный слой. Ночные приземные инверсии, которые придают устойчивость нижнему слою атмосферы, вообще исключает возможность даже возникновения конвекции до тех пор, пока с восходом Солнца прогрев воздуха не приведёт к разрушению инверсии [9].

Инверсии температуры в сочетании с различными скоростями ветра могут усиливать опасность накопления примесей или создавать условия для их рассеивания. Большую опасность для городов представляют застойные ситуации, когда приземная инверсия сопровождается слабым ветром. Максимум концентрации окиси углерода, например, наблюдается при застоях воздуха, а также при скорости ветра 5 м/с и приподнятой инверсии. Первый определяется выбросами из низких источников (автотранспорт), второй — выбросами из высоких труб и приподнятой инверсией над ними [10].

Инверсионный слой препятствует вертикальному перемешиванию воздуха и задерживает рассеивание примеси в атмосфере, а при штилевых

условиях возникает застой воздуха, что представлено на рисунке 7. Кроме того, повышение температуры воздуха также влечёт повышение уровня загрязнения атмосферного воздуха.

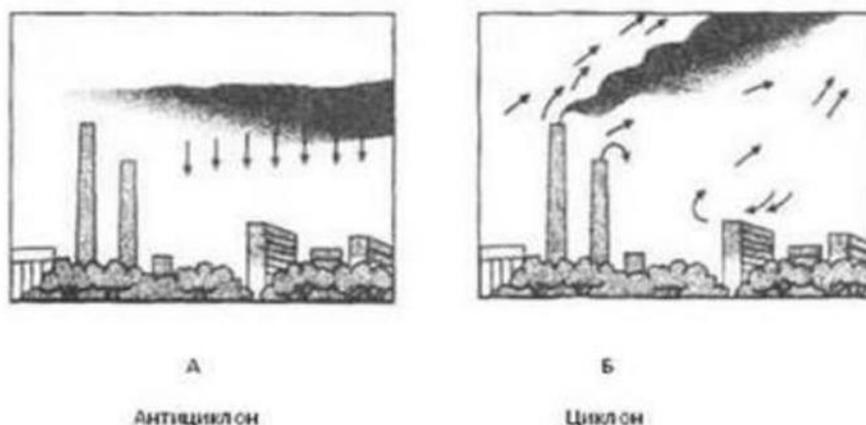


Рисунок 7- Распространение выбросов при приземной температурной инверсии

2.4 Оценка воздействия приземных инверсий на качество прогнозирования метеорологических условий Санкт-Петербурга

Приземные инверсии оказывают значительное влияние на метеорологические условия, особенно в крупных городах, таких как Санкт-Петербург [5]. Их неправильное прогнозирование может привести к серьезным ошибкам в оценке погодных условий, что, в свою очередь, влияет на повседневную жизнь населения и функционирование различных отраслей городского хозяйства.

Влияние инверсий на прогнозирование в Санкт-Петербурге

- Температура
- Приземные инверсии могут кардинально изменять температурный профиль атмосферы. Не учитывая их наличие, метеорологические модели могут давать неверные прогнозы температуры у поверхности.
 - В зимние месяцы, когда инверсии наиболее часты, прогноз может превышать фактическую температуру на 5-10°C.
- Загрязнение воздуха

- Наличие инверсий затрудняет дисперсию загрязняющих веществ, приводя к их накоплению в нижних слоях атмосферы. Прогнозы, игнорирующие этот фактор, могут не учитывать возможное ухудшение качества воздуха.

- Это особенно важно для прогнозов в периоды повышенного уровня выбросов, например, зимой, из-за усиленной работы отопительных систем.

- Видимость и туман

- Инверсии способствуют образованию тумана и снижению видимости, что важно для авиации и транспортной системы города.

- Прогнозы, своевременно учитывающие инверсии, позволяют заранее предупреждать о вероятном ухудшении видимости.

- Ветровая активность

- Ветер в инверсионном слое может быть значительно слабее, что влияет на транспорт и распределение воздушных масс. Это важно для понимания локальных погодных явлений.

- При прогнозировании атмосферных условий важно учитывать замедление и перемещение воздушных потоков в пределах инверсий.

- Осадки

- Наличие инверсий влияет на распределение влаги в атмосфере и может затруднять образование облаков и выпадение осадков.

- Прогнозирование инверсий позволяет более точно предсказывать изменения в вероятности осадков.

Практические аспекты прогнозирования

1. Моделирование приземных инверсий

- Разработка и интеграция локальных метеорологических моделей, способных учитывать влияние приземных инверсий.

- Эти модели должны использовать данные о плотности выбросов, топографических особенностях Санкт-Петербурга и других факторов, усиливающих эффект инверсий.

2. Мониторинг и датчики

- Установка дополнительных датчиков для мониторинга температуры, влажности и загрязнений воздуха.

- Регулярный сбор данных позволит улучшить алгоритмы прогнозов.

3. Координация с экологическими и промышленными секторами

- Сотрудничество с предприятиями города для учета выбросов и их влияния на инверсии.

- Объединение данных с экологическими службами для более точного прогнозирования и предупреждения о возможных условиях повышенного загрязнения.

Приземные инверсии представляют собой важный компонент метеорологических условий Санкт-Петербурга, и их учет необходим для точного прогнозирования и эффективного управления ресурсами города. Улучшение эко-метеорологического мониторинга и моделирования инверсий поможет снизить негативные последствия их воздействия на жизнь и здоровье населения [1].

2.5 Влияние температурных инверсий на другие сферы

Влияние приземных инверсий не ограничивается только загрязнением воздуха. Они также могут приводить к образованию тумана и дымки, ухудшающих видимость и затрудняющих движение транспорта. В зимний период инверсии способствуют образованию гололеда и наледи на дорогах, что повышает риск дорожно-транспортных происшествий. Кроме того, они могут влиять на температурный режим города, создавая "острова тепла" в центральных районах и вызывая локальные перепады температуры.

Температурная инверсия представляет опасность для взлетающих самолетов, так как при входе воздушного судна в вышележащие слои более теплого воздуха снижается тяга двигателей, а скорость полета уменьшается.

Поэтому для восстановления заданной скорости на той же высоте в условиях повышения температуры необходимо увеличивать мощность работы двигателей для обеспечения требуемых взлетных характеристик [11].

Кроме этого, можно выделить такое влияние температурных инверсий, как распространение внутренних гравитационных волн в атмосфере и радиоволн.

Ночные радиационные инверсии весной и осенью, а местами и летом могут возникать при снижении температуры поверхности почвы до отрицательных значений (заморозок), что вызывает повреждения многих культурных растений [12].

3 Анализ инверсий

3.1 Статистический анализ мощности (ΔH) и интенсивности (ΔT) инверсий, выявление закономерностей

Для оценки инверсий были изучены такие параметры, как:

- Интенсивность инверсии (ΔT) – разница температур между верхней и нижней границей слоя инверсии. Анализ интенсивности инверсий представлен на риске 8.

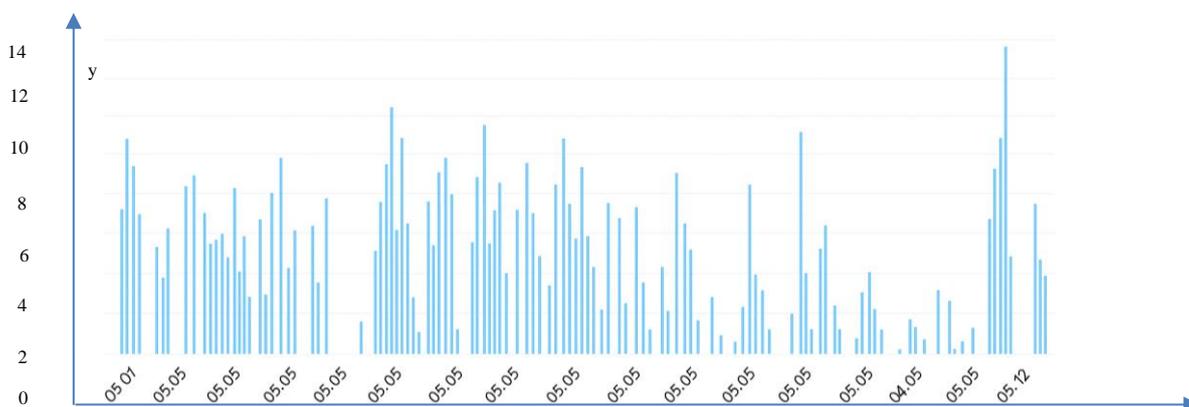


Рисунок 8- Анализ интенсивности инверсий в 2021 году (по месяцам)

- Мощность инверсии (ΔH) – толщина слоя инверсии, измеряемая в метрах.

Показатели мощности инверсии представлены на рисунке 9.



Рисунок 9- Показатели мощности инверсии в Санкт-Петербурге в 2021 году

Анализ проводился статистическими методами для каждого месяца с целью выявления закономерностей. Также оценено влияние инверсий на уровень загрязнения воздуха.

Общий анализ ΔH и ΔT

1. Среднее значение:

- Весной (март-май):
- Средняя мощность инверсий (ΔH) составляет 200-250 метров, максимальная – до 900 метров.

- Средняя интенсивность (ΔT) варьируется от 1,7°C до 4,5°C.

- Летом (июнь- август):

- ΔH достигает 150-200 метров, однако в середине июля отмечается мощность, превышающая 900м, что может быть связано с резким перепадом температуры.

- интенсивность ΔT в составе 1-3°C. Инверсии выражены слабо.

- Осенью (сентябрь-ноябрь):

- Среднее ΔH варьируется от 260 до 350 метров, интенсивность ΔT увеличивается до 5-8°C.

- Зимой (декабрь-февраль):

- Средняя мощность ΔH увеличивается до 400 метров и выше, интенсивность ΔT достигает 10-12°C.

2. Максимальные значения мощности и интенсивности инверсий:

- Зимой фиксируются наиболее мощные инверсии, когда ΔH превышает 700 метров, а ΔT достигает 12-15°C, что связано с устойчивым охлаждением земной поверхности.

- Летом подобные показатели практически отсутствуют – инверсии слабые или кратковременные.

Анализ по сезонам и погодным условиям



Рисунок 10 - Общее количество приземных инверсий в Санкт-Петербурге в 2021 году

Как видно из рис. 10, инверсии наблюдаются ежемесячно, максимальная частота всех инверсий зафиксирована в июле (26), минимальная — в ноябре

(4). Хорошо заметен годовой ход с увеличением повторяемости инверсий летний период, уменьшением — в весенний и осенний. Колебания повторяемости инверсий связаны с особенностями циркуляционных процессов, характерных в эти периоды; обычно высокая повторяемость инверсий наблюдается при преобладании антициклональной погоды, низкая

— в период активной циклонической деятельности

1. Весна:

- Большинство инверсий наблюдалось в ночное время (70% от общего числа случаев).

- Толщина слоя ΔН для весны: 200-300 метров; ΔТ: 2-5°C.

- Весенние инверсии оказывают умеренное влияние на загрязнение, так как дневные потоки прогревают нижние слои атмосферы.

2. Лето:

- Инверсии наблюдаются чаще, преимущественно в утренние часы.

- Толщина слоя ΔН не превышает 200 метров, ΔТ – 1-2°C.

- Минимальное влияние на загрязнения за счёт активной термической турбулентности.

3. Осень:

- Снижается частота инверсий.
- ΔH : 300-350 метров, ΔT : 4-8°C.
- Инверсии фиксируются чаще в холодные ночи.

4. Зима:

- Максимальная стабильность атмосферы.
- Толщина слоя ΔH : 400-700 метров, ΔT : 10-12°C.
- Возможна стагнация загрязняющих веществ, особенно в районах с интенсивным выбросом CO_2 .

Закономерности

1. Зависимость между ΔH и ΔT :

- Высокая интенсивность инверсии ΔT (например, выше 10°C) коррелирует с увеличением мощности ΔH .

- В зимний период такая зависимость проявляется наиболее явно.

2. Суточная зависимость:

- В ночное время мощности и интенсивность (ΔH и ΔT) возрастает более чем в 1,5 раза по сравнению с дневными часами.

3. Влияние инверсий на загрязнение:

- Наибольшее накопление загрязняющих веществ фиксируется зимой и осенью, когда атмосферные инверсии наиболее выражены.

- Летом и весной такие явления минимальны или отсутствуют.

Статистический вывод

- Средние показатели инверсий:

- ΔH : 300-350 м.

- ΔT : 6-8°C.

- Зависимость: в периоды года с высокой мощностью и интенсивностью инверсий (осень, зима) отмечается значительное ухудшение качества воздуха.

Рекомендации: учёт сезонной активности инверсий при выполнении экологического мониторинга и разработке мер по снижению вредных выбросов – особенно важно в позднюю осень и зиму [5].

3.2 Исследование влияния сезонных вариаций и антропогенных факторов на повторяемость и характеристики приземных инверсий

Приземные инверсии – это явления, при которых вблизи земли наблюдается слой холодного воздуха, накрытый слоем более теплого воздуха. Их повторяемость и характеристики (толщина слоя ΔH и температурная разница ΔT) изменяются под воздействием сезонных климатических изменений и антропогенных факторов. Данный раздел посвящен анализу этих зависимостей и выявлению важных закономерностей.

3.2.1 Сезонная повторяемость приземных инверсий

Сезонная повторяемость приземных инверсий представлена в таблице 2.

Таблица 2- сезонная повторяемость приземных инверсий

	Дневные приземные инверсии	Ночные приземные инверсии
Теплый период (апр-сент)	6	104
Холодный период	7	44

В таблице 1 указаны данные о количестве инверсий в теплый (апрель-сентябрь) и холодный (октябрь-март) периода 2021 годы. На основе полученных данных проведен статистический анализ.

Сезонная повторяемость ночных и дневных приземных инверсий представлена на рисунке 11.

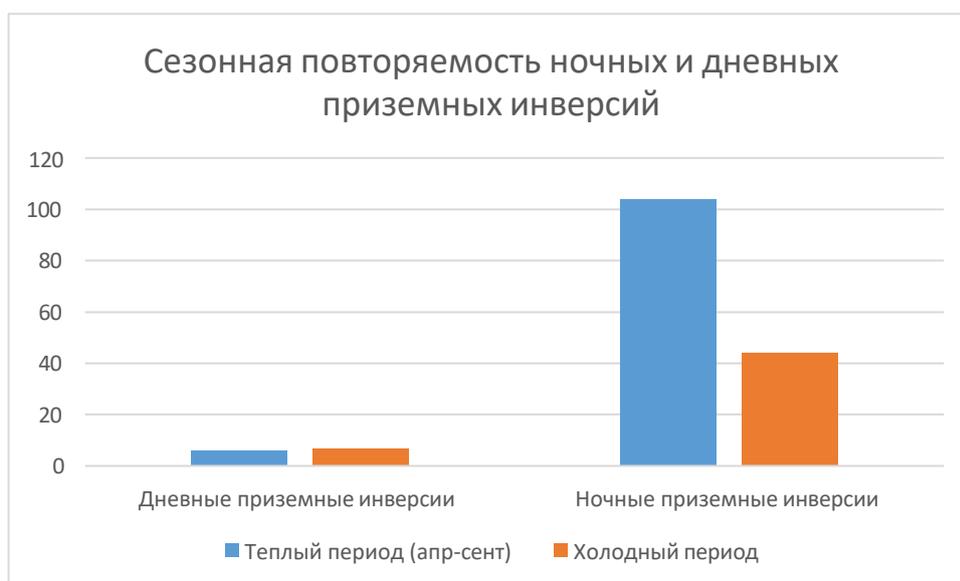


Рисунок 11- Повторяемость приземных инверсий

Преобладающим типом инверсий являются приземные инверсии, образующиеся в ночные часы, когда большую роль играет радиационное выхолаживание подстилающей поверхности и нижних слоев воздуха. Дневные инверсии наблюдались в 2021 году более чем в 10 раз реже ночных.

3.2.2 Сезонные вариации приземных инверсий

1. Зима:

- Наиболее мощные приземные инверсии, связанные с сильным охлаждением поверхности земли (радиационная инверсия).
- Повторяемость: до 90% ночью, особенно в безоблачную погоду с минимальной ветровой активностью.
- Характеристики:
 - Средняя мощность ΔH : 400-700 метров.
 - Средняя интенсивность ΔT : 8-12°C, может достигать до 15°C.
- Причины: долгий ночной период, сток холодного воздуха с возвышенностей, минимальная турбулентность атмосферы.
- Влияние: в условиях неизрасходованной теплоты в дневной период загрязняющие вещества, выбрасываемые в атмосферу, накапливаются под

слоем инверсии, не рассеиваясь.

2. Весна:

- Уменьшение повторяемости инверсий (50%-60%), однако часть ночей сохраняет инверсионные слои.

- Характеристики:

- ΔH : 200-350 метров.

- ΔT : 2-5°C.

- Причины: увеличение длины светового дня и повышения солнечной радиации, уменьшение устойчивого охлаждения.

- Влияние: значительное ослабление накопления загрязняющих веществ за счёт прогревания поверхности днём.

3. Лето:

- Минимальные показатели повторяемости (20-30% ночей), слабая выраженность инверсий.

- Характеристики:

- ΔH : до 200 метров.

- ΔT : менее 2°C.

- Причины: высокие температуры воздуха, развитая турбулентность и перемешивание воздуха в дневное время. Большое дневное затухание охлаждения ночью.

- Влияние: загрязнение воздуха минимально, так как слои атмосферы остаются перемешанными.

4. Осень:

- Увеличение частоты инверсий (60-80%), особенно в поздние месяцы (октябрь, ноябрь).

- Характеристики:

- ΔH : 250-400 метров.

- ΔT : 4-8°C.

- Причины: уменьшение солнечной радиации, удлинение ночного

периода и медленное остывание.

- Влияние: значительное, особенно в городах с высоким уровнем выбросов.

3.2.3 Антропогенные факторы

1. Индустриальные выбросы:

- Зоны с высокой концентрацией промышленных предприятий (тепловые электростанции, заводы) демонстрируют повышенную повторяемость инверсий.

- Причина: выбросы тёплого воздуха и микрочастиц (аэрозолей) создают дополнительные условия для формирования инверсий в результате локального охлаждения.

2. Городская среда:

- В городах формируется «тепловой остров», что усиливает температурный градиент над земной поверхностью.

- Влияние: более интенсивная ΔT (разница температур на верхней и нижней границе) наблюдается чаще в ночное время.

3. Транспорт и дорожное покрытие:

Загрязнение атмосферного воздуха определяется объемом выбросов загрязняющих веществ от стационарных и передвижных источников. Наиболее остро проблема загрязнения атмосферного воздуха ощущается в крупных городах с развитой промышленностью и большим количеством автотранспорта. К числу таких городов относится и Санкт-Петербург – второй по численности населения и промышленному потенциалу город России.

Вследствие влияния атмосферного аэрозоля на термический режим атмосферы отмечается изменение стратификации загрязненной атмосферы. Результаты расчетов, учитывающих влияние приземного слоя аэрозоля толщиной 300 м, показывают, что днем аэрозольный слой сильно прогревается за

счет поглощения коротковолновой радиации. Это усиливает неустойчивость атмосферы и способствует переносу аэрозольных загрязнений вверх. Ночью эффект аэрозоля менее отчетлив; при высокой концентрации аэрозоля происходит усиление выхолаживания, что способствует образованию инверсии над аэрозольным слоем и усилению устойчивости атмосферы [18].

В свою очередь приземные инверсии способствуют образованию повышенного уровня загрязнения в приземном слое, в основном за счет автомобильного транспорта.

Выбросы загрязняющих веществ от АТС г. Санкт-Петербурга в 2021 г. составили 128,9 тыс. т, в том числе: твердых веществ (сажи) - 0,5 тыс. т, диоксида серы (SO₂) - 1,2 тыс. т, оксида углерода (CO) - 102,4 тыс. т, оксидов азота (NO_x) – 16,7 тыс. т, метана (CH₄) – 0,2 тыс. т, аммиака – 2,3 тыс. т и летучих органических соединений (ЛОС) - 5,5 тыс. т.

В 2021 г. наблюдается снижение выбросов сажи на 16,7% (0,1 тыс. т), ЛОС – на 1,79% (0,1 тыс. т), CO – на 1,73% (1,8 тыс. т), NO_x – на 1,18% (0,2 тыс. т). Выбросы SO₂, CH₄ и NH₃ остались на уровне предыдущего (2020) года. Суммарные выбросы снизились на 1,6% (2,1 тыс. т) [16].

(ПРИЛОЖЕНИЕ А)

- Автомобильные выбросы оказывают локальное влияние на частоту и мощность инверсий.

- Следствием является повышение загрязнённости, особенно на оживлённых трассах зимой и осенью. Оксиды азота, выбрасываемые автотранспортом, являются основными причинами смога и формирования опасного озона на низких уровнях атмосферы.

4. Загрязняющие вещества:

- Скопление аэрозолей в инверсионных слоях усиливает продолжительность инверсии, так как загрязнение подавляет вертикальное перемешивание воздуха.

Выявленные закономерности

1. Повторяемость инверсий в 2021 году:
 - Наиболее высокая летом (до 90%), минимальная зимой (20-30%).
 - Более выраженные инверсии характерны для холодных сезонов года.
2. Увеличение интенсивности ΔT вблизи промышленных объектов и городов.
 - Вблизи источников выбросов ΔT может превышать средние значения на 2-3°C.
3. Антропогенные факторы усиливают мощность ΔH .
 - В районах высокой урбанизации или промышленного производства мощность ΔH выше в среднем на 50-100 метров.
4. Долгосрочное воздействие.
 - В зонах с высоким уровнем выбросов повторяемость инверсий может незначительно превышать региональные природные показатели, что связано с переносом тепловой энергии от источников выбросов.

В результате анализа вышеизложенных данных, можно прийти к следующим выводам:

1. Зависимость от сезонов: характеристики инверсий (ΔT и ΔH) значительно изменяются в течение года. Зимой и осенью они выражены наиболее интенсивно и играют ключевую роль в ухудшении качества воздуха.
2. Антропогенное воздействие: а в регионах с высокой плотностью транспортных потоков, промышленными выбросами и городской застройкой инверсии проявляются более устойчиво и предсказуемо.
3. Необходимость учёта данных: Для точного прогнозирования загрязнённости воздуха требуется подробный анализ приземных инверсий и их антропогенной составляющей на протяжении различных сезонов [13].

3.3 Анализ антропогенного воздействия на атмосферу и показателей уровня загрязняющих веществ в Санкт-Петербурге.

В 2021 году дискретные наблюдения за качеством атмосферного воздуха осуществлялись на 9-ти стационарных и одном маршрутном постах Государственной службы наблюдений за состоянием окружающей среды, принадлежащих ФГБУ «Северо-Западное УГМС». Непрерывные наблюдения за содержанием диоксида серы, оксида углерода, оксида азота, диоксида азота, озона в приземном слое воздуха города были произведены с помощью газоанализаторов на станциях Автоматизированной системы мониторинга атмосферного воздуха Санкт-Петербурга (АСМ), принадлежащей Комитету по природопользованию, охране окружающей среды и обеспечению экологической безопасности. В соответствии с санитарно-гигиеническими требованиями разовые и среднесуточные предельно допустимые концентрации (ПДК) являются основными характеристиками токсичности примесей, содержащихся в воздухе.

Для оценки качества атмосферного воздуха, полученные при измерениях на стационарных постах концентрации загрязняющих веществ (в мг/м³, мкг/м³, нг/м³) сравнивают с предельно допустимыми концентрациями (ПДК), которые установлены гигиеническими нормативами СанПиН 1.2.3685-

21 (I. Гигиенические нормативы содержания загрязняющих веществ в атмосферном воздухе городских и сельских поселений. Предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе городских и сельских поселений).

Согласно РД 52.04.667-2005 (Росгидромет) в качестве характеристик загрязненности атмосферного воздуха используются следующие показатели: средняя концентрация примеси (сравнивается со среднесуточной ПДК (ПДКс.с.)); стандартный индекс (СИ) - наибольшая разовая концентрация любого вещества, деленная на ПДК максимальную разовую (ПДКм.р.); наибольшая повторяемость превышения концентрациями ПДКм.р., выраженная в процентах (НП, %); комплексный индекс загрязнения атмосферы (ИЗА) - учитывает вклад отдельных примесей в общий уровень загрязнения,

выбираются 5 примесей с наибольшими парциальными значениями ИЗА. Для оценки качества воздуха за месяц принимаются показатели СИ и НП. Степень загрязнения атмосферы за год определяется по комплексному ИЗА. Значение комплексного ИЗА рассчитывается по пяти примесям, с наибольшими парциальными значениями ИЗА (при этом в расчете участвуют только те примеси, для которых имеются ПДКс.с.). Согласно значениям ИЗА, СИ, НП принято различать следующие степени загрязнения атмосферного воздуха (таблица 3) [14].

Таблица 3 - Оценка степени загрязнения атмосферы
Оценка степени загрязнения атмосферы

Степень		Показатели		
градации	загрязнение атмосферы	ИЗА	СИ	НП, %
I	Низкое	от 0 до 4	от 0 до 1	0
II	Повышенное	от 5 до 6	от 2 до 4	от 1 до 19
III	Высокое	от 7 до 13	от 5 до 10	от 20 до 49
IV	Очень высокое	≥ 14	> 10	> 50

Состояние загрязнения воздушного бассейна города зависит не только от количества выбросов загрязняющих веществ и их химического состава, но и от климатических условий, определяющих перенос, рассеивание и превращение выбрасываемых веществ. В целом климатические условия Санкт-Петербурга, влияющие на уровень загрязнения воздуха, несколько более благоприятны, чем в среднем по городам России (морской климат и благоприятные условия для рассеивания выбросов от промышленных предприятий и автотранспорта).

Согласно розе ветров, за год для Санкт-Петербурга город чаще продувается ветрами юго-западных (21 %) и западных (16 %) направлений. Вследствие этого над западными и юго-западными 6 районами города чаще, чем над северными и восточными, появляется более чистый воздух. В таблице 3 приведены многолетние климатические характеристики и за 2020 и 2021 годы. Схема расположения постов и станций мониторинга состояния загрязненности воздуха на территории Санкт-Петербурга представлена на рисунке 12.

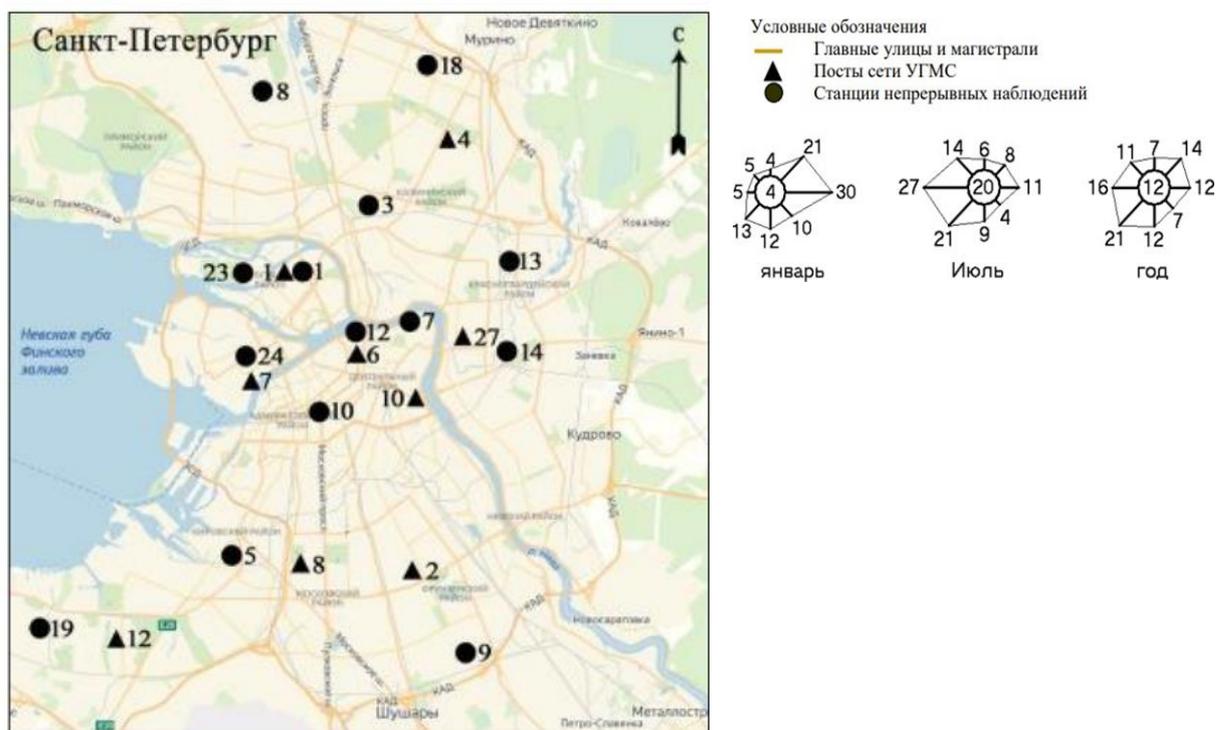


Рисунок 12- Схема расположения постов и станций мониторинга состояния загрязненности воздуха на территории Санкт-Петербурга и розу ветров за январь, июль и год

Климатические характеристики Санкт-Петербурга в 2020, 2021 представлены в таблице 4.

Таблица 4 - Климатические характеристики Санкт-Петербурга в 2020, 2021 гг. в сравнении с многолетними [14]

Среднегодовые данные	Многолетние	2020 г.	2021 г.
осадки, число дней	179*	231	237
скорость ветра, м/с	2,2*	2,1	1,9
повторяемость приземных инверсий, %	22,6	28,9	27,8
повторяемость застоев, %	7,6	4,1	6,0
повторяемость ветров со скоростью 0 - 1 м/с,	33,5*	35,1	42,5
повторяемость приподнятых инверсий, %	39,0	52,5	61,2
повторяемость туманов, %	0,6*	0,1	0,4

Устойчивость повышенной повторяемости приземных инверсий в 2021 году, по сравнению с многолетними данными, вызывает закономерную обеспокоенность в контексте ухудшения качества воздуха в городской среде и повышения риска неблагоприятных погодных явлений.

Анализ синоптических условий, сопутствующих формированию

приземных инверсий в 2021 году, указывает на преобладание антициклонального типа погоды, характеризующегося малооблачностью, слабым ветром и интенсивным ночным выхолаживанием поверхности.

Концентрации взвешенных веществ. Средняя концентрация в целом по Санкт-Петербургу составила 1,5 ПДКс.г., концентрация незначительно уменьшилась по сравнению с 2020 г. (рис. 12). Максимальная концентрация, измеренная в июле в Московском районе (пост № 8), превысила ПДКм.р. в 2,6 раз (СИ – 2,6). В течение года среднемесячные концентрации в целом по городу изменялись в пределах 0,5-1,3 ПДКс.с., наибольшая из них отмечалась в июле (рис. 13). Наибольшая повторяемость превышения концентрациями ПДК за год составила 2,2 %.

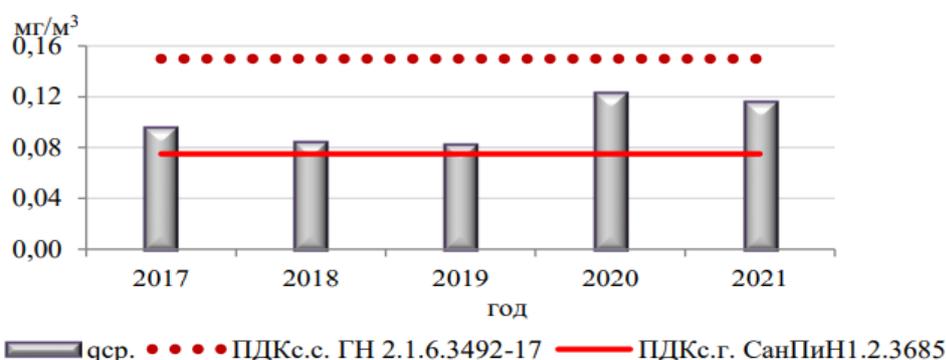


Рисунок 13 - Изменения среднегодовых концентраций взвешенных веществ в целом по городу за 2017-2021 годы, Санкт-Петербург, 2021.

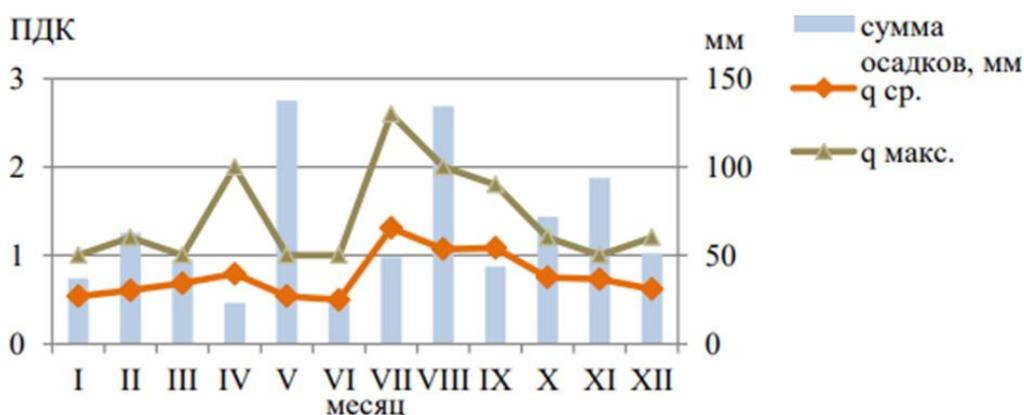


Рисунок 14 - Годовой ход максимальных и среднемесячных концентраций (в долях ПДК) взвешенных веществ в целом по городу и количества осадков, Санкт-Петербург, 2021 г.

По результатам анализа графика концентраций ПДК и сопоставления их с

результатами исследования годовых показателей мощности инверсий (рис. 9), можно проследить следующую закономерность: в апреле и в июле 2021 года в Санкт-Петербурге наблюдается значительное превышения уровня концентрации взвешенных веществ. В тот же период мощность инверсий резко возрастает. Однако, в зимний период такой тенденции не наблюдается, что может быть связано с низкой температурой воздуха и минимальным количеством осадков.

Концентрации диоксида серы, растворимых сульфатов. Рассчитанная по данным дискретных и непрерывных измерений средняя за год концентрация диоксида серы в целом по городу составила менее 0,1 ПДКс.с., максимальная концентрация - 0,4 ПДКм.р. (автоматическая станция № 2, Колпинский район). Средняя за год концентрация растворимых сульфатов составила 2 мкг/м³, максимальная разовая - 5 мкг/м³.

Концентрации оксида углерода. Рассчитанная по данным дискретных и непрерывных измерений в целом по городу средняя за год концентрация оксида углерода составила 0,2 ПДКс.г., максимальная из разовых концентраций была измерена в январе на автоматической станции № 9 во Фрунзенском районе и превысила ПДКм.р. в 3,4 раза (СИ – 3,4). Наибольшая повторяемость превышения концентрациями ПДК составила 0,1 %.

Концентрации диоксида азота/оксида азота. Средняя за год концентрация диоксида азота в целом по городу, рассчитанная по данным дискретных и непрерывных измерений, составила 0,7 ПДКс.г., по сравнению с прошлым годом практически не изменилась. Максимальная концентрация (СИ – 2,2) была измерена в декабре в Центральном районе (пост № 6), наибольшее значение НП в целом по городу – 0,5 %. Среднегодовая концентрация оксида азота, рассчитанная с учетом дискретных и непрерывных измерений, составила 0,2 ПДКс.г., максимальная концентрация – 1,9 ПДКм.р. (Выборгский район, автоматическая станция № 3, декабрь). Значение НП – 0,1 %. Для оксидов азота характерно увеличение концентраций в холодный период года (рис. 14).

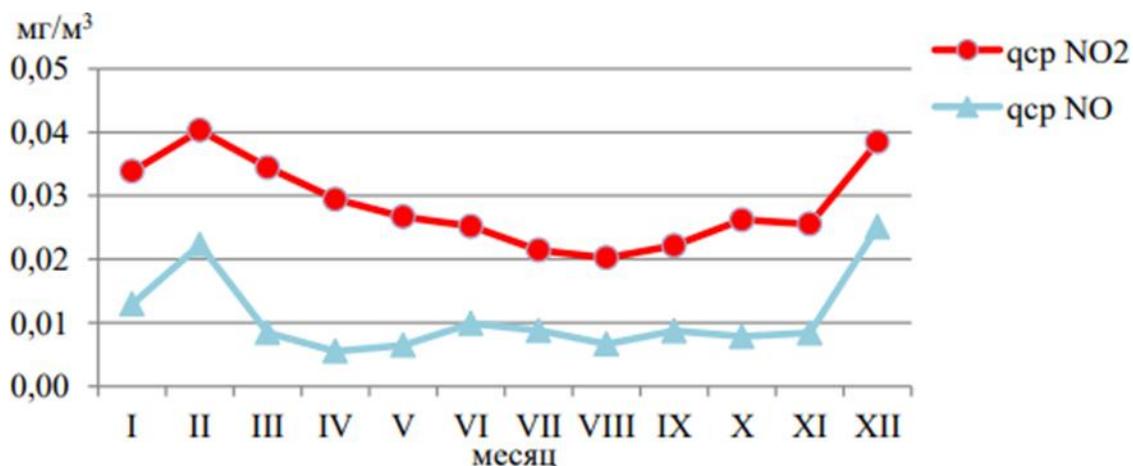


Рисунок 15- Годовой ход среднемесячных концентраций оксида и диоксида азота

Превышение концентрации оксидов азота (NO_x), в частности оксида азота (NO) и диоксида азота (NO₂), в атмосфере может привести к серьезным экологическим и медицинским последствиям. NO_x являются основными загрязнителями воздуха, образующимися преимущественно в результате сжигания ископаемого топлива, промышленной деятельности и выбросов автотранспорта.

Во-первых, NO_x способствуют образованию кислотных дождей. Реагируя с водой, кислородом и другими химическими веществами в атмосфере, они превращаются в азотную кислоту (HNO₃). Кислотные дожди наносят ущерб экосистемам, подкисляя почвы и водоемы, что негативно влияет на растительность, водную фауну и микроорганизмы.

Во-вторых, NO_x играют ключевую роль в образовании смога и озона (O₃) на уровне земли. Озон в стратосфере защищает нас от вредного ультрафиолетового излучения, но в тропосфере он является сильным раздражителем дыхательных путей. Высокие концентрации озона могут вызывать проблемы с дыханием, обострять астму и другие респираторные заболевания.

В-третьих, NO_x могут оказывать прямое воздействие на здоровье человека. Вдыхание высоких концентраций диоксида азота может вызвать раздражение слизистых оболочек, кашель, одышку и повысить

восприимчивость к респираторным инфекциям. Длительное воздействие NOx связано с развитием хронических заболеваний легких и сердечно-сосудистой системы.

Наконец, NOx могут способствовать изменению климата. Хотя они не являются основными парниковыми газами, они участвуют в сложных атмосферных реакциях, которые могут усиливать парниковый эффект.

В целом, превышение концентрации NOx в атмосфере является серьезной проблемой, требующей комплексных мер по снижению выбросов и улучшению качества воздуха.

Концентрации озона. Средняя за год концентрация озона, измеряемого на автоматических станциях, в целом по городу составила 1,2 ПДКс.г. Максимальная концентрация озона в 1,3 ПДКм.р. была зафиксирована в июле в Кронштадтском районе (автоматическая станция № 15), значение НП - 0,1 % [16].

Содержание углеводов в воздухе города не превышало санитарно-гигиенические нормы. Средние концентрации бензола, ксилолов, толуола, этилбензола в целом по городу менее 1 ПДКс.г. Значение СИ для этилбензола равно 1, для суммы ксилолов - 0,3, для бензола – 0,1 и толуола – менее 0,1.

Результаты наблюдений за содержанием тяжелых металлов (никеля, марганца, хрома, цинка меди, железа, кадмия и свинца) свидетельствуют об их наличии в атмосферном воздухе города, однако средние за год концентрации и наибольшие из среднемесячных концентраций не превышали соответствующие ПДК. Уровень загрязнения атмосферного воздуха Санкт-Петербурга в 2021 году квалифицировался как повышенный согласно комплексному индексу загрязнения (ИЗА) в соответствии с существующими методами оценки с учетом введения новых ПДК, установленных СанПиН 1.2.3685-21.

Основной вклад в загрязнение воздуха города вносили: взвешенные вещества, озон, аммиак, диоксид азота и формальдегид. По сравнению с 2020 годом значение ИЗА за 2021 год увеличилось. Увеличение комплексного ИЗА

произошло за счет повышения ИЗА взвешенных веществ и формальдегида. На рисунке 14.2.11 отображена динамика изменения значений ИЗА за последние пять лет. Уровень загрязнения воздуха в 2017 и 2021 годах квалифицировался как повышенный, с 2018 г. по 2020 г. – как низкий.

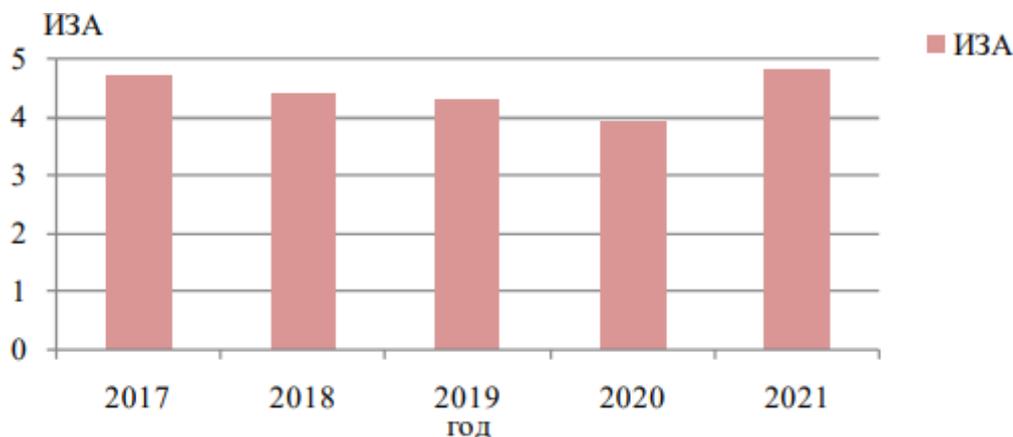


Рисунок 16- Уровень загрязнения воздуха в 2017-2021г.

По данным дискретных и непрерывных наблюдений в 2021 г. по сравнению с 2020 г. в целом по городу значения среднегодовых концентраций диоксида серы, оксида углерода, диоксида азота, оксида азота и суммы ксилолов увеличились, взвешенных веществ, сероводорода, формальдегида хлористого водорода, аммиака, бензола, толуола, этилбензола и бенз(а)пирена – уменьшились, растворимых сульфатов, озона и фенола – остались без изменений.

Концентрации оксидов азота, оксида углерода, диоксида серы, озона, определяются с использованием автоматических средств измерений (Свидетельство об утверждении типа средств измерений станций контроля загрязнений атмосферного воздуха автоматических унифицированных УС- КВ-1 RU.E.31.001A №61514) в соответствии с Руководством по эксплуатации станции контроля загрязнений атмосферного воздуха автоматической унифицированной «УС-КВ-1», ГГУП «СФ «Минерал», Санкт-Петербург, 2015 г.

На основе полученных данных экомониторинга, произведенных станцией, был проведен анализ показателей уровня загрязняющих веществ: оксида азота, диоксида азота диоксида серы, оксида углерода.

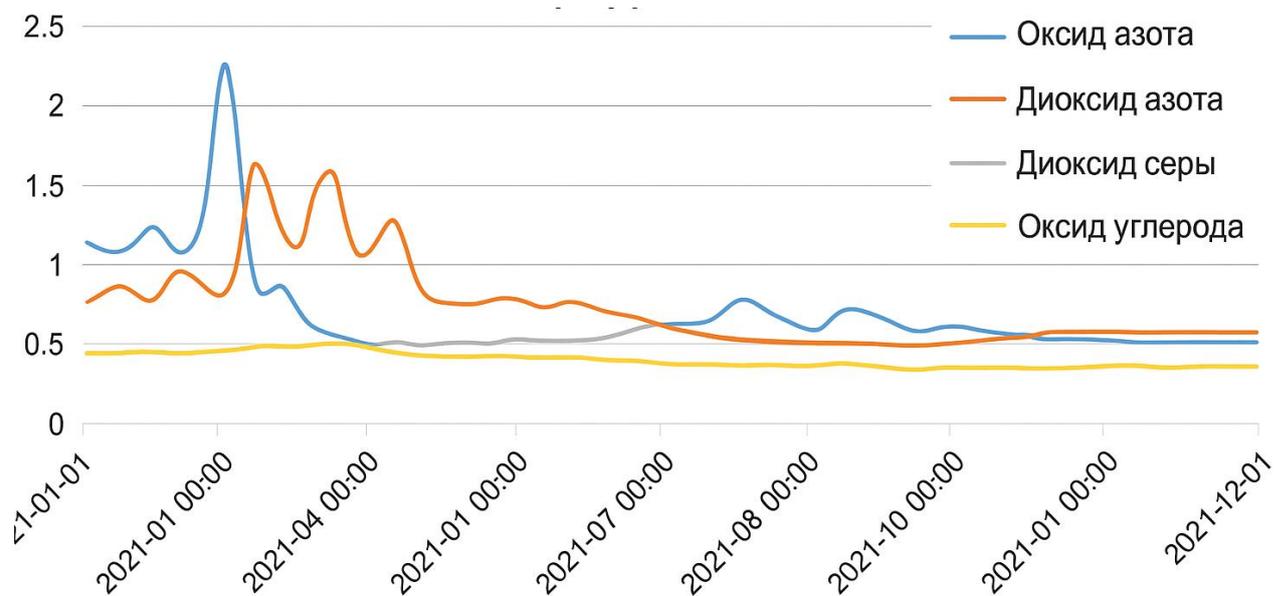


Рисунок 17- Данные автоматизированной системы мониторинга атмосферного воздуха

По данным исследования (рис.4) можно прийти к выводу, что уровень оксида азота и диоксида азота в первом квартале значительно превышает среднегодовые показатели и предельно допустимую концентрацию веществ в сутки, что может быть результатом промышленных выбросов на исследуемой территории. Показатели интенсивности и мощности инверсии в этот период также выше, чем, например, летом и осенью (Рисунок 1, 2).

Заключение

В данной работе исследовалась повторяемость приземных инверсий температуры воздуха, их пространственное распределение и влияние на качество атмосферного воздуха.

Характеристики инверсионного распределения воздуха исследовались по данным аэрологических зондирований на гидрометеорологической станции Воейково Ленинградской области. В обработку включены наблюдения за два срока (ночь 00 UTC и день 12 UTC), проводимые в течение двенадцати месяцев 2021 г. Были проанализированы такие параметры каждой инверсии как высота $H_{нг}$ и температура ее нижней границы $T_{нг}$, мощность инверсии ΔH , интенсивность ΔT .

Качество воздуха оценивалось путем сравнения среднесуточных концентраций загрязняющих веществ со среднесуточной ПДК (ПДК_{сс}). В основном нарушения стандартов качества наблюдались в дни с инверсиями.

В результате проведенных исследований и анализа литературных источников можно прийти к выводу, что на распространение и накопление антропогенных примесей большое влияние оказывает стратификация атмосферы, в частности инверсионные и изотермические слои, препятствующие вертикальному перемешиванию воздуха. Однако в разные сезоны года обусловленность колебаний концентраций загрязняющих веществ инверсионным распределением температуры имеет разное значение.

В ходе работы было установлено, что в летний период количество инверсий значительно выше, чем в другие исследуемые периоды, вместе с тем количество ВЗВ также превышает средние и допустимые показатели в зимний период. Исходя из данных исследования, можно прийти к выводу, что количество ВЗВ в атмосфере напрямую влияет на количество приземных инверсий на исследуемой территории.

Температурные инверсии играют важную роль в динамике загрязнения

атмосферы. Понимание этого явления и его последствий может помочь в разработке эффективных стратегий по улучшению качества воздуха и защите здоровья населения.

Результаты исследований повторяемости температурных инверсий могут быть использованы для прогнозирования качества воздуха, планирования градостроительства и разработки мер по снижению негативного воздействия инверсий на здоровье населения и окружающую среду.

Изучение повторяемости инверсий позволяет в дальнейшем прогнозировать их наличие, а также их интенсивность и мощность- важнейшие характеристики инверсий. Данный прогноз позволит предсказать случаи экстремально высоких концентраций вредных веществ в воздухе, что в свою очередь может помочь предупредить или устранить эти концентрации, а также их негативное влияние.

Список используемых источников

1. Сонькин Л. Р. Синоптико-статистический анализ и краткосрочный прогноз загрязнения атмосферы. — Л.: Гидрометеиздат, 1991. — 223 с.
2. Богаткин О. Г. Авиационные прогнозы погоды. — 2-е изд., стереотипное. — СПб.: БХВ-Петербург, 2010. — 288 с.
3. Ивлев Л. С. Аэрозоли и глобальные изменения климата // Общество. Среда. Развитие. — 2012. — № 4. — С. 238–244.
4. Назначение технологии мониторинга и прогнозирования региональных климатических изменений [Электронный ресурс]. — Режим доступа:
http://voeikovmgo.ru/download/souznoe_gos/itogovy_otchet_SBR_1_2010.pdf (дата обращения: 09.06.2025).
5. Доклад об экологической ситуации в Санкт-Петербурге в 2021 году [Электронный ресурс] / Правительство Санкт-Петербурга. — Режим доступа: https://www.gov.spb.ru/static/writable/ckeditor/uploads/2022/06/27/05/Доклад_2022_собранный.pdf (дата обращения: 09.06.2025).
6. Дашко Н. А. Курс лекций по синоптической метеорологии. — Владивосток: ДВГУ, 2005. — 523 с.
7. Клиновский А. Б., Пинус З. Н. Аэрология. Методы аэрологических измерений. — Л.: Гидрометеорологическое изд-во, 1961. — 180 с.
8. Крюкова С. В., Симакина Т. Е. Анализ загрязнения воздушного бассейна: лабораторный практикум. — СПб.: РГГМУ, 2018. — 60 с.
9. Хргиан А. Х. Физика атмосферы. — Л.: Гидрометеорологическое изд-во, 1969. — 646 с.
10. Тверской П. Н. Курс метеорологии. Физика атмосферы. — Л.: Гидрометеиздат, 1963. — 700 с.
11. Головина Е. Г. Особенности антропогенного влияния на метеорологический режим атмосферы в низких широтах: учебное пособие. —

Л.: ЛГМИ, 1990. — 83 с.

12. Смит К. Основы прикладной метеорологии. — Л.: Гидрометеиздат, 1978. — 424 с.

13. Жданова Е. Ю., Чубарова Н. Е. Пространственная изменчивость аэрозольной оптической толщины на территории Московского региона по спутниковым и наземным данным // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. — 2018. — Т. 15, № 7. — С. 236–248.

14. Романовская А. Ю., Савин И. Ю. Аэрозольная пыль почвенного происхождения в атмосфере: источники, количество, свойства (обзор) // Бюл. Почвенного ин-та им. В. В. Докучаева. — 2021. — Вып. 109. — С. 36–95.

15. Самуленков Д. А., Сапунов М. В. Исследование содержания аэрозолей лидарным методом в Выборгском районе Ленинградской области и г. Санкт-Петербурге // Гидрометеорология и экология. — 2023. — № 73. — С. 653–665.

16. Оперативное информирование экипажей воздушных судов об опасных метеоявлениях в районах арктических посадочных площадок // Научный вестник МГТУ ГА. — 2023. — № 2. — С. 137–147.

17. Шкляев В. А., Шкляева Л. С. Исследование инверсий нижней атмосферы по результатам наблюдений метеорологического температурного профилемера и радиозондирования // Географический вестник. — 2014. — № 1. — С. 4–13.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Выбросы загрязняющих веществ от стационарных источников г. Санкт-Петербурга, тыс. т

Годы	Всего*	Твердые вещества	SO ₂	CO	NO _x	CH _x **	ЛОС
2011	65,9	1,6	6,4	16,7	23,4	10,0	3,8
2012	68,9	1,9	5,6	19,1	27,7	8,8	4,7
2013	72,3	1,9	3,2	22,4	27,6	8,6	8,3
2014	70,5	2,1	2,6	21,1	24,5	15,0	5,0
2015	73,2	2,2	2,2	19,1	23,0	20,4	5,9
2016	78,3	2,3	2,5	21,6	25,6	20,8	5,1
2017	87,3	3,2	2,5	26,8	26,4	22,4	5,5
2018	83,9	4,4	2,0	27,3	26,2	18,7	4,8
2019	66,9	2,6	2,0	28,8	25,7	2,0	5,5
2020	67,0	3,0	2,3	27,7	25,1	1,9	6,6
2021	72,2	3,3	2,2	30,0	28,4	1,8	6,0
Увел. (+), сниж. (-) по отношению к 2020 г., тыс. т	5,2	0,3	-0,1	2,3	3,3	-0,1	-0,6
Увел. (+), сниж. (-) по отношению к 2020 г.	7,46%	10,00%	-4,35%	8,30%	13,15%	-5,26%	-9,09%
<p><i>Примечание:</i> *Значение в колонке «Всего» соответствует сумме выбросов всех твердых газообразных и жидких загрязняющих веществ на территории субъекта. **CH_x – углеводороды без ЛОС</p>							