

Матвеев Роман Сергеевич

Северный (Арктический) государственный университет, РФ, г. Архангельск

**ОСОБЕННОСТИ РАССЕИВАНИЯ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ В
ПРИЗЕМНОМ СЛОЕ АТМОСФЕРЫ В УСЛОВИЯХ ХОЛОДНОГО
ПРИБРЕЖНОГО КЛИМАТА (НА ПРИМЕРЕ ГОРОДА
АРХАНГЕЛЬСКА)**

Аннотация. Цель – обобщение данных о влиянии метеоусловий на рассеивание загрязняющих веществ в приземном слое атмосферы в холодном прибрежном климате на примере Архангельска. Выявлены ключевые факторы: температурные инверсии, высокая доля штилей, повышенная влажность, частая облачность, бризовая циркуляция. Установлено, что зимние инверсии и штили способствуют накоплению примесей, тогда как летняя конвекция и бризы улучшают рассеивание. В арктических городах метеоусловия и сезонность важнее уровня выбросов для эпизодических превышений ПДК.

Abstract. The aim is to generalize data on the influence of meteorological conditions on pollutant dispersion in the surface atmospheric layer under cold coastal climate, using Arkhangelsk as a case study. Key factors identified include temperature inversions, a high proportion of calms, increased humidity, frequent cloudiness, and breeze circulation. Winter inversions and calms were found to promote pollutant accumulation, while summer convection and breezes improve dispersion. In Arctic cities, weather conditions and seasonality are more important than emission levels for episodic exceedances of maximum permissible concentrations.

Ключевые слова: рассеивание загрязняющих веществ; приземный слой атмосферы; холодный прибрежный климат; Архангельск; температурная инверсия; неблагоприятные метеорологические условия; бризовая циркуляция; качество атмосферного воздуха.

Keywords: pollutant dispersion; surface atmospheric layer; cold coastal climate; Arkhangelsk; temperature inversion; adverse meteorological conditions; breeze circulation; air quality.

1. Введение

Выбросы загрязняющих веществ в атмосферу приводят к ухудшению качества окружающей среды, что, в свою очередь, повышает риски возникновения проблем со здоровьем населения, снижает качество жизни и сокращает её продолжительность. При повышенных концентрациях загрязняющих веществ (свыше предельно допустимых концентраций) длительное воздействие на организм человека приводит к комплексному снижению функционирования всех систем органов, в особенности кровеносной и дыхательной систем, что проявляется в виде сердечно-сосудистых заболеваний, бронхолёгочных патологий и рака лёгких [1]. Данные риски более актуальны для крупных городов с развитой транспортной сетью, промышленностью и электроэнергетикой, являющимися главными источниками загрязнения атмосферного воздуха.

Архангельск, как крупный промышленный город Северо-Западного федерального округа, расположенный в северных широтах в сравнительной близости к Белому морю, в устье реки Северная Двина, характеризуется холодным климатом и выраженными особенностями циркуляции воздуха. Географические и климатические условия определяют специфическую циркуляцию загрязняющих веществ от различных источников антропогенной деятельности, обусловленную воздействием арктических воздушных масс, которые в зависимости от времени года по-разному влияют на физические характеристики приземного слоя атмосферы.

Цель данной работы – обобщение и систематизация литературных данных об особенностях воздействия метеорологических условий на рассеивание загрязняющих веществ в приземном слое атмосферы в условиях холодного прибрежного климата на примере города Архангельска.

2. Методы и принципы исследования

Объектом исследования является приземный слой атмосферы в пределах городской агломерации Архангельска. Предмет исследования –

метеорологические и климатические факторы, определяющие условия рассеивания загрязняющих веществ в холодном прибрежном климате.

В работе использованы следующие источники информации:

1. Метеорологические данные с автоматизированной метеорологической станции, расположенной в центральной части Архангельска, за десятилетний период с 01.12.2016 по 01.12.2025 [4]. Проанализированы следующие параметры: температура воздуха, относительная влажность, облачность (количество дней с облачностью нижнего и среднего яруса), скорость и направление ветра, количество дней с туманами.
2. Материалы Северного управления по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Северное УГМС) – ежемесячные обзоры гидрометеорологических условий по Архангельской области за 2020–2025 гг. [11], содержащие сведения о неблагоприятных метеорологических условиях (НМУ) – штилях, слабом ветре, инверсиях, туманах.
3. Научная литература – монографии, статьи и учебные пособия по вопросам рассеивания загрязняющих веществ, стратификации атмосферы, пограничного слоя атмосферы и бризовой циркуляции [1, 2, 3, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 12, 13].

Исследование выполнено с применением статистического метода – расчёт средних многолетних значений температуры, влажности, доли штилей, частоты туманов и облачности по данным метеонаблюдений за 2016–2025 гг.; метода сравнительного анализа – сопоставление сезонных изменений ветрового режима, стратификации и эффективности рассеивания загрязняющих веществ в разные периоды года (зима, весна, лето, осень); метода картографического и графического анализа – интерпретация розы ветров и схем бризовой циркуляции для выявления преобладающих направлений переноса воздушных масс; метода обобщения научной литературы – систематизация теоретических представлений о стратификации, турбулентном перемешивании, температурных инверсиях и их влиянии на рассеивание примесей в приземном слое.

Достоверность результатов обеспечена использованием официальных данных государственной метеорологической службы и рецензируемых научных источников. Обработка данных выполнялась в среде табличного процессора с применением стандартных статистических функций.

3. Основные результаты

Архангельск является крупнейшим городом Русского Севера с населением около трёхсот тысяч человек, расположен вблизи Северного полярного круга и имеет координаты $64,5^{\circ}$ с.ш. и $40,5^{\circ}$ в.д. [2]. Город построен в устьевой части реки Северная Двина в сорока километрах от места её впадения в Белое море (рис. 1).



Рисунок 1 – Карта дельты Северной Двины

Климат Архангельска характеризуется как умеренно-холодный и морской-континентальный, что обуславливает его продолжительную зиму. Начало зимнего периода (переход среднесуточной температуры ниже 0°C) в Архангельске наступает во второй декаде ноября и завершается в первой декаде апреля. По данным монографии И.В. Грищенко [3], среднегодовая температура в Архангельской области колеблется от 1 до $1,5^{\circ}\text{C}$; в январе температура

варьирует от $-12,5$ до $-14,0^{\circ}\text{C}$, в июле достигает наибольших средних значений в $16,1\text{--}17,2^{\circ}\text{C}$.

Близость к морю определяет специфику физических свойств приземного слоя атмосферы и метеорологических условий Архангельска, характеризующихся частой облачностью, высокими значениями относительной влажности воздуха и выраженной вариабельностью атмосферного давления. Анализ данных метеорологической станции, расположенной в центре города, за десятилетний период (с декабря 2016 по декабрь 2025 года) [4] показывает, что количество дней с облачностью нижнего или среднего яруса составило 60%. Относительная влажность воздуха за этот же период составила 81%, что является высоким показателем, при котором различные загрязняющие вещества могут иметь повышенные концентрации [5, 6].

В течение года направления ветров имеют ярко выраженную изменчивость: с мая по июль включительно преобладают северные и северо-западные ветры, которые к августу сменяются южными направлениями; с сентября по март преобладают ветры южного сектора, постепенно сменяющиеся в апреле (рис. 2).

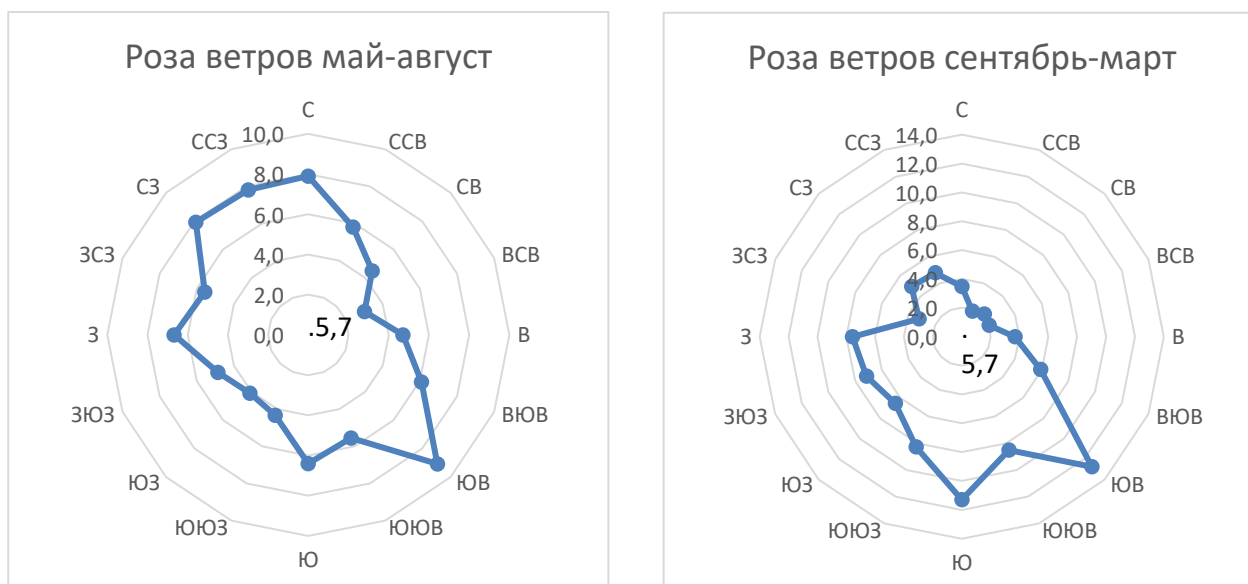


Рисунок 2 – роза ветров в разные периоды года

Архангельск относится к арктическим/приарктическим территориям, экосистемы которых являются чувствительными к загрязнению воздуха и

переносу загрязняющих веществ, в особенности сажи, концентрации которой удобно анализировать в зимний период методом отбора проб снега.

Рассеивание загрязняющих веществ – это процесс, при котором движущиеся частицы вынуждены отклоняться от прямой траектории из-за локализованных неоднородностей в среде, через которую они проходят. Моделирование процессов рассеивания загрязняющих веществ в атмосферном воздухе даёт возможность количественно оценить уровень антропогенной нагрузки, а также обосновать эффективность мероприятий, направленных на снижение отрицательного воздействия на компоненты окружающей среды и здоровье населения. На процесс рассеивания влияет целый ряд факторов [7], среди которых: климатические и метеорологические условия (температура воздуха, скорость и направление ветра, давление, влажность и др.), особенности проектировки промышленных предприятий, рельеф местности, определяющий места скопления загрязняющих веществ различной плотности.

Ключевым фактором является стратификация атмосферы. Вследствие этого свойства температура воздуха в разных слоях имеет различные закономерности, поэтому загрязняющие вещества, достигающие определённых высот, переносятся по-разному. Стратификация разделяется на три вида: устойчивая, нейтральная и неустойчивая [8]. При нейтральной стратификации частицы загрязняющих веществ с повышением высоты охлаждаются с той же скоростью, что и окружающий воздух, что обеспечивает предсказуемые условия рассеивания. При устойчивой стратификации частицы загрязняющих веществ имеют более низкую температуру, чем окружающая среда, и начинают с более высокой скоростью оседать на поверхность. При неустойчивой стратификации загрязняющие вещества не успевают должным образом охладиться, возникают эффекты конвекции и турбулентности, вследствие которых частицы переносятся на большие расстояния.

Данные физические процессы наблюдаются в пограничном слое атмосферы (ПСА) — нижней части тропосферы, непосредственно взаимодействующей с поверхностью земли. Важнейшей характеристикой ПСА является высота слоя

смешения, определяющая предельный объём рассеивания загрязняющих веществ. Ключевым процессом в пограничном слое служит турбулентное перемешивание — хаотическое вихревое движение, обеспечивающее вертикальный и горизонтальный перенос примесей, тепла и влаги. На интенсивность турбулентности и высоту слоя смешения влияют три фактора: ветер, создающий механическую турбулентность за счёт трения о подстилающую поверхность (городская застройка, лесные массивы); конвекция (термическая турбулентность), возникающая при неустойчивой стратификации; шероховатость подстилающей поверхности, усиливающая трение и турбулентный обмен. Эти процессы достигают максимальных значений днём (увеличивая рассеивание) и минимальных ночью (способствуя накоплению загрязняющих веществ у поверхности) [9, 10].

Все перечисленные процессы могут усугубляться неблагоприятными метеорологическими условиями (НМУ): штилем, слабым ветром, инверсиями, туманами. НМУ — это условия, препятствующие рассеиванию и способствующие накоплению загрязняющих веществ в воздухе. Они кратковременны, но оказывают значительное негативное влияние на качество атмосферного воздуха и здоровье населения.

В условиях Архангельска наибольший интерес представляют устойчивые приземные инверсии в холодный период года, формирующиеся при антициклональной погоде и слабом ветре. В такие периоды слой эффективного перемешивания значительно уменьшается, а локальные источники выбросов определяют уровень загрязнения у поверхности.

Инверсия температуры — аномальное состояние атмосферы, при котором температура воздуха не падает, а растёт с высотой. Это противоположность нормальной (стандартной) стратификации, когда температура с высотой закономерно понижается (в среднем на $0,6\text{--}1^{\circ}\text{C}$ на каждые 100 м). Для северных городов актуальны радиационные инверсии, часто наблюдающиеся в зимний период в ясную погоду. В таких условиях быстро остывающая земная

поверхность формирует холодный приземный слой воздуха, который препятствует рассеиванию загрязняющих веществ, приводя к их накоплению.

При поступлении на северные территории тёплых воздушных масс формируется адвективная инверсия, создающая эффект, сходный с радиационной инверсией. Данный тип инверсии наиболее характерен для Архангельска, так как в зимний период ветер чаще всего дует с южных направлений, принося воздух, который теплее подстилающей поверхности. В сочетании с повышенным атмосферным давлением в этот период фиксируются увеличенные концентрации загрязняющих веществ, включая оксиды различных элементов и сажевые аэрозольные частицы различной дисперсности, что создаёт предпосылки для формирования смога и роста риска обострения заболеваний у населения.

Адвективная инверсия актуальна и в летний период. В это время в Архангельске начинает играть роль близость к холодным водам Белого моря и Северной Двины, создающая значительный градиент температуры между нагретой днём сушей и холодной водой, что вызывает бризовую циркуляцию приземного слоя атмосферы, влияющую на рассеивание и движение загрязняющих веществ.

Ветровой режим в Архангельске имеет ярко выраженную сезонность и преобладающее направление ветров в разные сезоны. Анализ десятилетнего периода метеонаблюдений показывает, что доля штилей в Архангельске составляет 5,6%. Наибольшая доля штилей наблюдалась в январе, феврале и августе (9,4%, 6,9% и 6,9% соответственно) (табл. 1).

Таблица 1. Доля штилей по месяцам за десятилетний период (01.12.2016 – 01.12.2025), %

Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь
9,4	6,9	3,9	4,3	4,2	5,4
Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь
6,2	6,9	5,6	3	5,3	6,1

Высокая доля штилей связана с частой антициклональной погодой в эти месяцы, при которой снижается количество осадков, повышается атмосферное давление, зимой наблюдается похолодание, а летом – повышение температуры воздуха. При низкой скорости ветра (менее 1–2 м/с) турбулентный перенос сильно ослаблен, вследствие чего загрязняющие вещества начинают скапливаться в приземном слое атмосферы, что является одним из критериев для определения неблагоприятных метеорологических условий.

В последнее десятилетие окрестности и центр Архангельска активно застраиваются многоэтажными домами. При определённых направлениях ветра в разных частях города могут образовываться, условно называемые, «уличные каньоны», затрудняющие рассеивание загрязняющих веществ. Однако грамотное проектирование и градостроительство позволяют избежать (хотя и не всегда) вероятного накопления загрязнений от автотранспортной сети.

В прибрежных условиях холодного климата часты туманы, особенно при адвекции тёплого и влажного воздуха над холодной поверхностью (или наоборот). В Арктике адвективный туман является типичным явлением. Данное НМУ создаёт условия для укрупнения аэрозольных частиц вследствие конденсационных и коагуляционных процессов, что отражается на их физических свойствах и аэродинамическом поведении в приземном слое атмосферы.

Согласно ежемесячным обзорам гидрометеорологических условий по Архангельской области [11], такие НМУ, как туман, достаточно часты и встречаются на территории области до 15 дней в месяц, особенно в октябре (в

октябре 2025 года отмечено 20 туманных дней). Туманы и повышенная влажность воздуха в прибрежных районах, с одной стороны, способствуют укрупнению частиц взвешенных веществ, а с другой – формируют условия слабого ветра и устойчивой стратификации, что препятствует эффективному рассеиванию примесей.

Расположение у водных объектов существенно влияет на рассеивание загрязняющих веществ в приземном слое атмосферы. Для северных широт водные объекты имеют период ледостава, при котором аккумулятивное воздействие температуры водных масс практически отсутствует, поэтому наибольшее значение бризовая циркуляция имеет в летний и межсезонный периоды.

На основании данных [12], разница температур в 3°C является достаточной для формирования бризовой циркуляции воздуха. Для Архангельска бризы актуальны с мая по октябрь: чем выше градиент температур, тем более мощный бризовый фронт возможен, достигающий высот более 800 м над земной поверхностью (рис. 3).

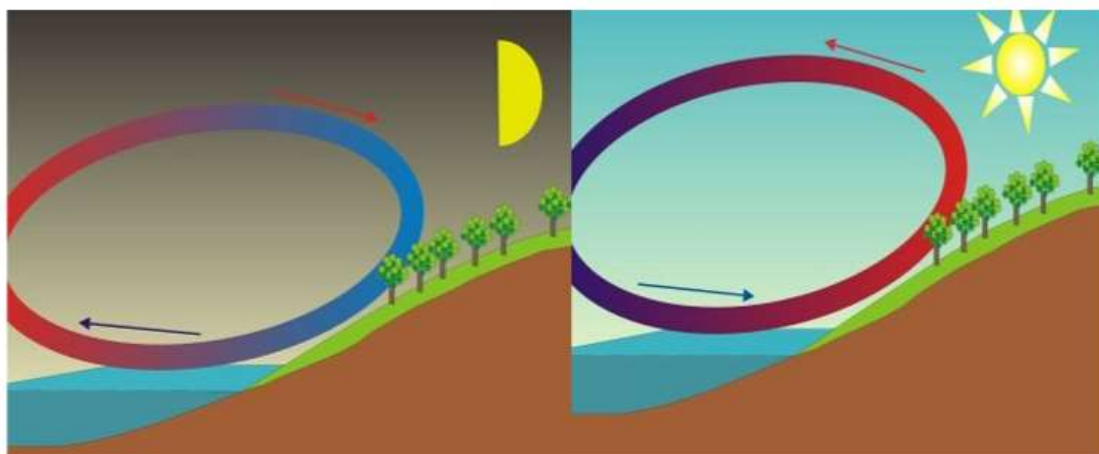


Рисунок 3 – Циркуляция ночного и дневного бриза

Для прибрежных зон бризовая циркуляция является важным механизмом перемешивания и переноса загрязняющих веществ. Однако она может влиять как положительно (унося примеси от источников загрязнения – портов, Архангельской ТЭЦ), так и отрицательно (принося загрязнения с других территорий – Архангельского ЦБК, Северодвинского Севмаша). В моменты

смены направления бриза (от дневного к ночному и наоборот) в 18:00 и 4:00 концентрации загрязняющих веществ повышаются в 1,3–1,4 раза, достигая максимальных значений на расстоянии 1,5–2 км от берега [13].

На основе анализа наиболее значимых факторов, влияющих на рассеивание загрязняющих веществ в атмосфере северных прибрежных территорий, рассмотрим их сезонную изменчивость (табл. 2).

Таблица 2. Сезонная изменчивость условий рассеивания загрязняющих веществ в Архангельске

Сезон	Доминирующие типы циркуляции	Характерные НМУ	Эффективность рассеивания
Зима	Антициклональная, южные ветры	Штиль, инверсии (радиационные, адвективные), повышенное давление	Низкая
Весна	Переходный тип, смена направлений ветра	Туманы, повышенная влажность, инверсии при потеплениях	Средняя (постепенное улучшение)
Лето	Бризовая циркуляция, северные ветры	Конвекция, бризы, туманы при адвекции	Высокая
Осень	Переходный тип, усиление южных ветров	Туманы (до 20 дней в месяц), повышенная	Средняя (постепенное ухудшение)

Сезон	Доминирующие типы циркуляции	Характерные НМУ	Эффективность рассеивания
		влажность, инверсии при похолоданиях	

В зимний период, характеризующийся низкими температурами и повышенной влажностью, наиболее значимыми являются частая штилевая погода и длительное воздействие антициклональных воздушных масс, приводящее к повышенному атмосферному давлению. Данные условия вызывают возникновение инверсий, снижают высоту слоя смешения, вызывают накопление загрязняющих веществ и затрудняют их дальнейшее рассеивание в городской среде.

В летний тёплый период ситуация улучшается за счёт усиления конвекции, повышающей слой смешения, и бризовой циркуляции, способствующей переносу воздушных масс с примесями загрязняющих веществ. В межсезонье наблюдается постепенное улучшение ситуации после зимы и ухудшение после летнего периода. Осенью и весной отмечается комбинация часто возникающих туманов, повышенной влажности и наступающих инверсий.

4 Обсуждение

Полученные обобщения представляют практический интерес при интерпретации данных постов наблюдений за качеством атмосферного воздуха в Архангельске, а также при разработке мероприятий на период неблагоприятных метеорологических условий.

Неблагоприятные метеорологические условия – это метеорологические условия, способствующие накоплению загрязняющих веществ в приземном слое атмосферного воздуха. Основными типами НМУ по данным Северного УГМС [11] являются краткосрочные сочетания метеорологических факторов (штиль,

слабый ветер, ветер неблагоприятного направления, туман, инверсия), способствующие накоплению вредных веществ.

Юридические лица, имеющие источники выбросов загрязняющих веществ, при получении прогнозов НМУ обязаны проводить мероприятия по уменьшению выбросов. На примере Архангельского ЦБК во время предупреждений о НМУ проводятся режимные мероприятия: ограничение работы котельных, снижение нагрузок на технологические аппараты, оптимизация работы газоочистного оборудования.

Интерпретация данных мониторинга в Архангельске невозможна без учёта конкретных метеоситуаций: один и тот же уровень выбросов при конвективном дне или при ночной инверсии даёт принципиально разные концентрации.

5 Заключение

В городах типа Архангельска метеорологические условия и сезонность зачастую имеют большее значение для суточных и эпизодических превышений концентраций загрязняющих веществ, чем абсолютный уровень выбросов. Проведённое исследование позволяет выделить следующие ключевые факторы:

1. Зимние приземные инверсии (радиационные и адвективные) и штилевые погоды, вызывающие застой загрязнённого воздуха от антропогенной деятельности;

2. Туманы и высокая влажность, способствующие изменению физических свойств сажеподобных и взвешенных частиц различной дисперсности, их укрупнению и негативному воздействию на здоровье населения;

3. Бризовая циркуляция в тёплый период года, в большинстве случаев способствующая очищению воздуха от примесей загрязняющих веществ, но в моменты смены направления бриза создающая кратковременные повышения концентраций;

4. Выраженная сезонность, комплексно влияющая на рассеивающую способность приземного слоя атмосферы: от низкой эффективности зимой до высокой летом.

Теоретическое понимание этих процессов является основой для дальнейших прикладных исследований рассеивания загрязняющих веществ не только в арктических прибрежных городах, но и в целом на территории Российской Федерации.

Список литературы

1. Рахманин Ю.А., Новиков С.М., Румянцева Г.И., и др. Оценка риска воздействия химических загрязнителей на здоровье населения. – М.: НИИ ЭЧ и ГОС, 2015. – 420 с.
2. Атлас Архангельской области / под ред. В.В. Крылова. – М.: ФГУП «ГОСГИСЦЕНТР», 2019. – 128 с.
3. Грищенко И.В. Климат Архангельской области: монография. – Архангельск: Изд-во САФУ, 2020. – 198 с.
4. Северное управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. Метеорологические данные по г. Архангельску за период 2016-2025 гг. – Архангельск: Северное УГМС, 2025.
5. Безуглая Э.Ю., Сонькин Л.Р. Метеорологический потенциал загрязнения атмосферы // Труды ГГО. – 2018. – Вып. 582. – С. 3-18.
6. Израэль Ю.А. Экология и контроль состояния природной среды. – М.: Гидрометеиздат, 2019. – 560 с.
7. Берлянд М.Е. Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы. – Л.: Гидрометеиздат, 2015. – 448 с.
8. Марчук Г.И. Математическое моделирование переноса примесей в атмосфере. – М.: Наука, 2016. – 216 с.
9. Стадник В.В., Яковлев А.И. Пограничный слой атмосферы и его роль в рассеивании загрязняющих веществ // Экология и промышленность России. – 2021. – № 3. – С. 22-28.

10. Алексеев В.В., Петрова Н.А. Турбулентность в пограничном слое атмосферы: учебное пособие. – СПб.: РГГМУ, 2020. – 180 с.

11. Северное управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. Обзоры гидрометеорологических условий по Архангельской области за 2020-2025 гг. – Архангельск: Северное УГМС, 2020-2025.

12. Панченко М.В., Сидоренко Н.С. Бризовая циркуляция в прибрежных зонах северных морей // Метеорология и гидрология. – 2022. – № 6. – С. 45-56.

13. Николаев П.И., Козлов С.А. Влияние бризов на распределение загрязняющих веществ в прибрежной зоне // Экологический вестник. – 2023. – № 2 (38). – С. 67-74.