Научная статья

УДК 551.524.3:504.3.054

ВЛИЯНИЕ КОТЛОВИННОГО РЕЛЬЕФА И ТЕМПЕРАТУРНЫХ ИНВЕРСИЙ НА НАКОПЛЕНИЕ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ В ПРИЗЕМНОМ СЛОЕ АТМОСФЕРЫ КРАСНОЯРСКА

Седых Владислав Александрович, кандидат географических наук, Воронежский государственный университет, Россия, Липецк, stonebridge@rambler.ru

Аннотация. В городах, расположенных в долинно-котловинных формах рельефа, качество атмосферного воздуха особенно чувствительно к вертикальной устойчивости нижней тропосферы. Для Красноярска данная особенность приобретает выраженное геоэкологическое значение в холодный период года, когда интенсивность антропогенных выбросов сочетается с продолжительными слабоветренными ситуациями и температурными инверсиями, ограничивающими вертикальный воздухообмен. Цель работы состояла в выявлении топоклиматических сочетаний, при которых формируется устойчивое накопление мелкодисперсных частиц $PM_{2.5}$, а также в разработке типологии метеорологических ситуаций по степени геоэкологического риска. Материалом послужили опубликованные в 2024–2026 гг. результаты инструментальных наблюдений за атмосферой Красноярска, включая измерения $PM_{2.5}$, приземной температуры, влажности, давления, скорости и направления ветра, данные температурного профилемера МТП-5 и сведения о пространственной репрезентативности городской сети мониторинга. При интерпретации принципиально разграничены температура земной поверхности Land Surface Temperature, температура приземного воздуха, поверхностный городской остров тепла и собственно температурная инверсия. Установлено, что высокий риск продолжительного накопления $PM_{2.5}$ определяется не наличием городской тепловой аномалии как таковой, а сочетанием слабого ветра с низко

расположенным инверсионным слоем, устойчивой стратификацией и сокращением эффективного объема атмосферы, доступного для рассеивания примесей. Для Красноярска особенно неблагоприятны ситуации с ветром менее 2 м/с и приземными либо низкими инверсиями, нижняя граница которых находится в пределах первых 100–150 м. Сильная приподнятая инверсия сама по себе не всегда сопровождается максимальными концентрациями аэрозоля, что исключает возможность использования единственного температурного критерия для оценки загрязнения. Предложена геоэкологическая типология атмосферных состояний, учитывающая положение и интенсивность инверсии, ветровой режим и морфологическую позицию участка в пределах городской территории. Полученные обобщения предназначены для совершенствования мониторинга атмосферного воздуха и учета топоклиматических ограничений при территориальном планировании Красноярска.

Ключевые слова: Красноярск; $PM_{2.5}$; температурная инверсия; котловинный рельеф; атмосферная стратификация; загрязнение воздуха.

Original article

TOPOCLIMATIC CONDITIONS OF SPATIOTEMPORAL $PM_{2.5}$ ACCUMULATION IN THE URBAN ENVIRONMENT OF KRASNOYARSK: THE ROLE OF BASIN TOPOGRAPHY AND TEMPERATURE INVERSIONS

Sedykh Vladislav Aleksandrovich, Candidate of Geographical Sciences, Voronezh State University, Lipetsk, Russia, stonebridge@rambler.ru

Annotation. Urban areas situated within valley and basin landforms are especially sensitive to changes in the thermal stability of the lower atmosphere. This feature is environmentally significant for Krasnoyarsk during the cold season, when anthropogenic emissions coincide with persistent low-wind conditions and temperature inversions that suppress vertical mixing. The study aims to identify combinations of

topographic and meteorological factors associated with sustained $PM_{2.5}$ accumulation and to develop a typology of atmospheric situations according to their geoenvironmental risk. The analysis draws on studies published in 2024–2026 that report instrumental observations in Krasnoyarsk, including $PM_{2.5}$ measurements, near-surface temperature, humidity, pressure, wind speed and direction, vertical temperature profiles obtained with an MTP-5 profiler, and assessments of the spatial representativeness of urban air-quality monitoring sites. Land Surface Temperature, near-surface air temperature, the Surface Urban Heat Island and atmospheric temperature inversions are treated as physically distinct variables. The evidence indicates that prolonged $PM_{2.5}$ accumulation is controlled primarily by the joint occurrence of weak winds, low-level temperature inversions, stable stratification and a reduced atmospheric mixing volume, rather than by the urban thermal anomaly itself. Particularly unfavorable conditions in Krasnoyarsk are associated with wind speeds below 2 m s^{-1} and surface-based or low-level inversions located within approximately the lowest 100–150 m of the atmosphere. Strong elevated inversions do not invariably produce the highest aerosol concentrations; consequently, inversion intensity cannot be used as an isolated indicator of pollution hazard. A typology of urban atmospheric states is proposed based on inversion geometry and strength, wind conditions and topographic position within the city. The results provide a basis for refining urban air-quality monitoring and for incorporating topoclimatic constraints into spatial planning in Krasnoyarsk.

Keywords: Krasnoyarsk; PM2.5; temperature inversion; basin topography; atmospheric stratification; air pollution.

Введение. Загрязнение атмосферного воздуха в крупном промышленном городе определяется не только объемом и составом поступающих в атмосферу выбросов. Не менее существенное значение имеет способность нижней тропосферы переносить и рассеивать примеси. При одинаковой эмиссионной нагрузке концентрация аэрозоля у земной поверхности может различаться в

несколько раз в зависимости от скорости ветра, глубины перемешанного слоя и вертикального распределения температуры. Для городов, занимающих долины и межгорные понижения, данная зависимость выражена сильнее, поскольку рельеф ограничивает горизонтальный воздухообмен и создает условия для накопления холодного воздуха в пониженных частях территории. Современные исследования городских котловин показывают, что ночные холодные воздушные бассейны способны формировать устойчивую инверсионную структуру мощностью порядка первых сотен метров, внутри которой резко ослабевают турбулентность и перенос примеси за пределы приземного слоя [4].

Для Красноярска проблема имеет дополнительную специфику. Городская территория вытянута вдоль долины Енисея, а сочетание долинно-террасного рельефа с суровым зимним климатом создает пространственно неодинаковые условия проветриваемости. В холодное время года низкие температуры поддерживают устойчивую стратификацию, отопительный сезон сопровождается повышенной нагрузкой на атмосферу, а продолжительные периоды слабого ветра уменьшают скорость удаления примесей из приземного слоя. Инструментальные наблюдения, выполненные в Красноярске в зимние сезоны 2022–2024 гг., уже позволили сопоставить содержание $PM_{2.5}$ с вертикальными температурными профилями и разделить инверсионные эпизоды по их строению. Автор установил статистически выраженную зависимость аэрозольного загрязнения от характера и интенсивности температурной стратификации, причем продолжительные эпизоды связаны прежде всего с теми состояниями атмосферы, при которых инверсия непосредственно ограничивает нижний слой воздуха над городом [1].

Связь между формированием острова тепла и рассеиванием загрязняющих веществ требует терминологического уточнения. Температура земной поверхности, определяемая по тепловым каналам спутника, не является температурой приземного воздуха. Разность Land Surface Temperature между урбанизированным и фоновым участками характеризует поверхностный

городской остров тепла, тогда как атмосферный городской остров тепла относится к температуре воздушной среды. Температурная инверсия представляет третье явление: она описывает вертикальный градиент температуры, при котором воздух на некоторой высоте оказывается теплее нижележащего слоя. Эти характеристики могут взаимодействовать, но взаимозаменяемыми индикаторами они не являются. Современные сопоставления спутниковых продуктов LST показывают, что величина рассчитанного поверхностного теплового острова зависит даже от типа сенсора, времени съемки и алгоритма восстановления температуры поверхности [8]. Для перехода от LST к температуре воздуха необходимы наземные измерения или специально обученные модели, причем ошибка преобразования остается ненулевой даже при качественной калибровке [14].

Отсюда следует принципиальное для геоэкологической интерпретации положение. Высокая температура городской поверхности не должна заранее рассматриваться как фактор усиления загрязнения. В одних ситуациях термическая неоднородность поддерживает локальную конвекцию и способствует перемешиванию; в других господствующая над городом устойчивая стратификация блокирует этот процесс. Поэтому причинная цепочка должна начинаться не с предполагаемого воздействия «острова тепла», а с фактически наблюдаемой вертикальной структуры атмосферы. Такой подход согласуется и с современными исследованиями аэрозольного загрязнения в городских котловинах, где максимальное содержание $PM_{2.5}$ наблюдается внутри устойчивого холодного слоя при слабой турбулентности и низкой высоте атмосферного перемешивания [2].

Объект настоящего исследования — приземная атмосфера урбанизированной территории Красноярска в зимних метеорологических условиях. Предметом выступает изменение условий накопления $PM_{2.5}$ под влиянием вертикальной температурной стратификации, слабого ветра и морфологии городской территории. Цель работы состоит в выделении сочетаний

топоклиматических признаков, наиболее благоприятствующих формированию продолжительных эпизодов загрязнения, и разработке на их основе геоэкологической типологии, пригодной для интерпретации мониторинговых данных и решения задач территориального планирования.

Исследование сочетает анализ физических характеристик атмосферы, оценку изменений качества атмосферного воздуха под техногенным воздействием и геоинформационное моделирование геоэкологических процессов. Действующий паспорт специальности непосредственно относит к ее проблематике моделирование геоэкологических процессов, современное геоэкологическое картографирование и применение ГИС-технологий.

Обзор литературы. В исследованиях последних лет все отчетливее прослеживается переход от упрощенной трактовки инверсии как бинарного признака «есть/нет» к анализу ее вертикальной геометрии. Для оценки условий рассеивания необходимо знать, где начинается инверсионный слой, какова его мощность, насколько велика разность температур между нижней и верхней границами и как долго сохраняется такое состояние. Cordeiro на материале топографической котловины в районе Коимбры сочетал наземные наблюдения с вертикальными измерениями и показал, что в ночные часы внутри понижения формируется холодный воздушный бассейн мощностью порядка 100–120 м. Над ним располагается инверсионный слой, а скорость ветра в центральной части понижения приближается к нулю [4]. В подобной конфигурации даже сравнительно небольшая территория оказывается частично изолированной от вышележащего перемешанного воздуха.

Физическая роль котловины хорошо просматривается и на примере более крупного урбанизированного бассейна, рассмотренного M. Zhang и соавторами. Во время эпизодов формирования холодного воздушного бассейна аэрозоль концентрировался преимущественно в нижних нескольких сотнях метров, тогда как ослабление ветрового сдвига и турбулентного обмена замедляло вынос частиц. Авторы также обращают внимание на обратную связь: повышенная

аэрозольная нагрузка изменяет радиационный баланс и способна дополнительно влиять на состояние пограничного слоя [2]. Для геоэкологии городской атмосферы существенен именно этот нелинейный характер процесса. Метеорологические условия воздействуют на загрязнение, однако уже накопившийся аэрозоль может менять энергетический режим нижнего слоя атмосферы.

Исследования зимнего загрязнения в альпийских долинах дополняют данную картину анализом источников. M. Masiol с соавторами показали, что относительная роль различных компонентов $PM_{2.5}$ может быть корректно оценена лишь при учете инверсионной динамики и способности атмосферы к рассеиванию [6]. Накопление аэрозоля в долине не означает, что инверсия является его источником: она лишь меняет объем воздуха, в котором распределяются продукты эмиссии. Это разграничение особенно важно применительно к Красноярску. Совпадение эпизода загрязнения с отопительным периодом само по себе не позволяет количественно разделить вклад теплоэнергетики, индивидуального отопления, автотранспорта и других источников. Для такой задачи необходимы либо детализированные данные инвентаризации выбросов с достаточным пространственно-временным разрешением, либо расчеты переноса примесей.

Вертикальное положение аэрозольного слоя относительно инверсии имеет самостоятельное диагностическое значение. Z. Zhu и соавторы, сопоставляя температурные инверсии с вертикальным распределением аэрозоля, установили, что зимой наиболее выраженное накопление частиц наблюдается ниже инверсионной границы, причем интенсивность температурного скачка заметно влияет на эффективность «запирания» аэрозоля [10]. Результат нельзя механически переносить на любой город, поскольку региональная циркуляция и рельеф меняют структуру пограничного слоя, но он подтверждает необходимость вертикальных измерений. Одна приземная температура не содержит информации о том, что происходит на высоте 50, 100 или 300 м, а

именно эта часть профиля определяет, открыт ли приземный воздух для турбулентного обмена.

В опубликованной в 2026 г. работе по крупнейшей аридной городской агломерации, расположенной в бассейне, Q. Liang и соавторы дополнительно показали роль синоптической обстановки. При застойной циркуляции формировались устойчивый холодный воздушный бассейн, сильная инверсия и мелкий пограничный слой; вторжение холодного воздуха и усиление северо-западного потока, напротив, разрушали устойчивую структуру и улучшали вентиляцию [12]. Здесь важен механизм: котловинная форма задает потенциальную предрасположенность к застою, однако реальный уровень риска определяет конкретная циркуляционная ситуация.

Российская источниковая база последних лет позволяет существенно конкретизировать эти общие закономерности применительно к Красноярску. Н. Я. Шапарев, А. В. Токарев и О. Э. Якубайлик исследовали зимние температурные инверсии на основе городских метеорологических наблюдений, измерений $PM_{2.5}$ и данных профилемера МТП-5. Авторы различили радиационные и адвективные режимы, показав, что инверсионные состояния могут сохраняться как несколько часов, так и несколько суток. Наиболее значимым результатом является не сам факт частого появления инверсий, а различия в их экологических последствиях: концентрация $PM_{2.5}$ зависит от категории, вертикального положения и интенсивности инверсионного слоя [1].

Работа М. И. Малимонова, В. В. Заворуева, Т. В. Якубайлик и О. Э. Якубайлика расширяет этот вывод. По данным трехлетнего периода 2022–2024 гг. наиболее высокие уровни $PM_{2.5}$ были характерны прежде всего для приземных инверсий в пределах нижних приблизительно 150 м при скорости ветра менее 2 м/с. При этом сильная приподнятая инверсия не во всех случаях приводила к превышению концентраций аэрозоля. В зимнее время инверсионное состояние атмосферы регистрировалось более половины времени наблюдений, а эпизоды с большой температурной разностью не являлись редкими

исключениями [7]. Тем самым для Красноярска уже имеется эмпирическое основание отказаться от простейшей схемы, при которой любая интенсивная инверсия автоматически считается синонимом высокого загрязнения.

Отдельная методическая проблема связана с качеством измерений $PM_{2.5}$. Е. Д. Карепова и В. С. Петракова сопоставили данные городской сети оптических датчиков CityAir с референсными измерениями E-BAM и показали, что необработанные показания требуют статистической корректировки, зависящей в том числе от метеорологических условий и сезона [3]. Для анализа коротких зимних эпизодов этот вывод принципиален. Если ошибка сенсора закономерно меняется с влажностью или температурой, часть наблюдаемой связи между концентрацией аэрозоля и погодными условиями может быть обусловлена особенностями измерений. Следовательно, до экологической интерпретации необходимо отделять реальную динамику концентрации от особенностей прибора.

Еще один локальный фактор обнаруживается при рассмотрении Енисея. О. Е. Yakubailik, V. V. Zavoruev и Т. V. Yakubailik сопоставили вертикальные температурные профили над урбанизированной частью города и участком, связанным с речной долиной. В зимний период знак температурных различий между участками менялся с высотой: в нижних десятках метров термическое влияние незамерзающего Енисея проявлялось иначе, чем выше 100 м, а зона перехода могла распространяться до высот порядка 200 м [9]. Для пространственной интерпретации загрязнения это означает, что речной коридор нельзя механически считать ни постоянной «зоной вентиляции», ни постоянным источником локального прогрева. Его воздействие зависит от высоты, времени суток и общей стратификации атмосферы.

Наконец, репрезентативность мониторинговой сети зависит от местной проветриваемости. С. В. Михайлюта и А. А. Леженин рассмотрели условия размещения постов контроля атмосферного загрязнения Красноярска и показали необходимость учитывать ветровой режим конкретного пункта наблюдений [5].

Пост, расположенный в локально экранированном участке, характеризует не только общегородскую атмосферную ситуацию, но и окружающую его застройку и рельеф. Сопоставление станций без учета этого фактора может привести к ошибочному распространению локальных характеристик отдельного участка на всю городскую территорию.

Совокупность современных публикаций позволяет сформулировать исследовательский пробел более точно. В Красноярске уже измеряются $PM_{2.5}$, метеорологические параметры и вертикальная температура; разработаны процедуры корректировки оптических сенсоров; исследуются проветриваемость постов и особенности профиля над Енисеем. Тем не менее эти блоки нередко рассматриваются раздельно. Для геоэкологической задачи требуется свести их в единую интерпретационную схему, в которой рельеф задает пространственные предпосылки, вертикальная стратификация характеризует текущее состояние атмосферы, ветер определяет интенсивность горизонтального обмена, а концентрация $PM_{2.5}$ рассматривается как результат совместного действия эмиссии и условий рассеивания. Именно такая схема положена в основу настоящего исследования.

Методы исследования. Работа выполнена в формате ретроспективного сравнительного анализа опубликованных материалов об атмосферном загрязнении Красноярска и топоклиматических условиях накопления $PM_{2.5}$. Основную локальную группу составляют исследования, содержащие сведения об инструментальных измерениях концентраций мелкодисперсных частиц, температурных профилях атмосферы и характеристиках ветрового режима за зимние сезоны 2022–2024 гг. Для методического сопоставления используются также публикации 2024–2026 гг., посвящённые формированию холодных воздушных бассейнов и влиянию температурных инверсий на аэрозольное загрязнение. В сравнительный анализ включаются источники, позволяющие установить территорию наблюдения, измеряемую величину, временной масштаб и применяемый метод [1, 7].

В качестве основного индикатора состояния атмосферного воздуха выбрана концентрация $PM_{2.5}$. Данный выбор позволяет работать с высокочастотными рядами и сопоставлять их с быстро меняющимися метеорологическими условиями. Бенз(а)пирен не используется в качестве центральной переменной. Его включение оправдано лишь при наличии сопоставимого по частоте и длительности ряда измерений, тогда как основная исследовательская задача требует синхронного анализа на часовом либо суточном шаге. Такой отказ от расширения перечня загрязнителей снижает риск ложного объединения показателей, имеющих различную периодичность контроля.

При рассмотрении данных оптических датчиков учитывается их метрологическая неоднородность. Результаты CityAir интерпретируются только с учетом разработанной для Красноярска процедуры приведения к референсным измерениям Е-ВАМ. Исследование Е. Д. Кареповой и В. С. Петраковой выполнено на материале девяти автоматических постов региональной системы и двадцати одной станции CityAir и показало систематические различия между типами измерителей [3]. Следовательно, необработанный ряд оптического сенсора нельзя непосредственно объединять с референсным рядом и использовать для установления метеорологических зависимостей.

Наземный метеорологический блок включает температуру воздуха, относительную влажность, атмосферное давление, скорость и направление ветра. Особое внимание уделяется ветру, поскольку вертикальная устойчивость без слабого горизонтального обмена не обязательно приводит к продолжительному накоплению частиц. В исследованиях Красноярска скорость около 2 м/с выступает практически значимой границей, ниже которой загрязнение при низких инверсиях заметно усиливается [7]. Эта величина используется как локально установленный ориентир.

Данные LST отведены в отдельный аналитический блок. Их функция заключается в описании неоднородности нагрева и охлаждения поверхности.

Рельеф в аналитической схеме рассматривается как постоянная географическая предпосылка формирования слабопроветриваемых участков. Для пространственного анализа существенны абсолютная и относительная высота, положение относительно днища долины, степень топографической замкнутости, ориентация склонов и открытость участка по отношению к преобладающему направлению ветра. Эти параметры целесообразно получать из цифровой модели рельефа и сопоставлять с характеристиками локальной ветровой обстановки.

Таблица 1 — Состав информационных блоков и их роль в геоэкологическом анализе

Информационный блок	Основные показатели	Аналитическая функция	Принципиальное ограничение
Качество воздуха	$PM_{2.5}$, часовые и суточные значения	Характеристика интенсивности и длительности эпизода загрязнения	Оптические датчики требуют локальной корректировки
Приземная метеорология	температура воздуха, влажность, давление, скорость и направление ветра	Оценка условий горизонтального обмена и фоновой метеорологической ситуации	Одна наземная станция не характеризует вертикальную стратификацию
Вертикальный температурный профиль	(z_b), (z_t), (H_{inv}), (\Delta T_{inv})	Выделение приземных и приподнятых инверсий, оценка их геометрии	Требуется непрерывность профилеметрических наблюдений
Рельеф	высота, относительное положение, экспозиция, топографическая открытость	Выделение потенциально слабопроветриваемых морфологических позиций	DEM не позволяет самостоятельно диагностировать застой воздуха
Спутниковая термометрия	LST, SUHI	Характеристика пространственной тепловой неоднородности поверхности	LST не является температурой приземного воздуха
Характеристика пунктов мониторинга	положение в рельефе и застройке, локальная проветриваемость	Оценка пространственной репрезентативности измерений	Локальный микроклимат может искажать общегородскую интерпретацию

Источник: составлено автором на основе [1–5, 7–10, 14].

Синхронизация данных имеет ключевое значение. Среднемноголетняя карта LST не должна сопоставляться с отдельно взятым часовым эпизодом $PM_{2.5}$, а месячная температура не может заменять фактический профиль атмосферы в момент загрязнения. Корректная единица анализа — конкретный эпизод, для которого одновременно известны концентрация аэрозоля, приземные метеорологические условия и вертикальная температурная структура. Более длительные показатели используются лишь после агрегирования сопоставимых эпизодов.

Источник загрязнения в настоящей работе специально не определяется по одному временному совпадению. Сезонное увеличение концентрации в период отопления еще не доказывает долю ТЭЦ, частного сектора или транспорта. Такая задача требует отдельного эмиссионного массива. Настоящее исследование отвечает на иной вопрос: при каких состояниях городской атмосферы условия для удаления уже поступивших примесей из приземного слоя наиболее неблагоприятны.

Результаты исследования и их обсуждение. Сопоставление работ по Красноярску с результатами исследований других топографических бассейнов показывает, что геоэкологически неблагоприятная ситуация возникает не вследствие одного признака, а при совпадении нескольких условий. Первым служит устойчивая вертикальная стратификация в нижней части атмосферы. Вторым — слабый горизонтальный перенос. Третьим выступает морфологическое положение городской территории, способствующее удержанию холодного воздуха. Если один из этих элементов исчезает, вероятность длительного эпизода загрязнения уменьшается.

Для аналитической типологии неблагоприятных условий накопления $PM_{2.5}$ используются три группы характеристик: положение нижней границы устойчивого слоя атмосферы, скорость приземного ветра и наличие топографических предпосылок ослабленного воздухообмена. В рассмотренных локальных исследованиях наиболее неблагоприятные ситуации связываются с

низкими инверсиями, затрагивающими нижние приблизительно 100–150 м атмосферы, и скоростью ветра менее 2 м/с [1, 7]. С геоэкологической точки зрения уменьшается объем воздуха, доступный для рассеивания примесей: выбросы продолжают поступать, однако их разбавление происходит в меньшей массе воздуха.

Особенно существен вывод о различии приземных и приподнятых инверсий. Сильная температурная разность на высоте не обязательно означает столь же сильное загрязнение возле поверхности. Если под инверсионным слоем сохраняется достаточно глубокая зона перемешивания или усиливается горизонтальный перенос, аэрозоль распределяется в большем объеме. Напротив, сравнительно менее интенсивная, но очень низкая инверсия способна оказаться экологически более неблагоприятной.

Данные Института вычислительного моделирования СО РАН дополняют эту зависимость более конкретными метеорологическими сочетаниями. При низко расположенных инверсиях и температурном перепаде свыше нескольких градусов увеличение $PM_{2.5}$ особенно заметно в морозную погоду и при малой скорости ветра. Вместе с тем выраженная приподнятая инверсия может сохраняться без столь же высокого приземного содержания частиц. Такое расхождение имеет принципиальный смысл: одно и то же слово «инверсия» описывает существенно различные по геоэкологическим последствиям состояния атмосферы.

Механизм можно представить на поперечном профиле котловинной части города.

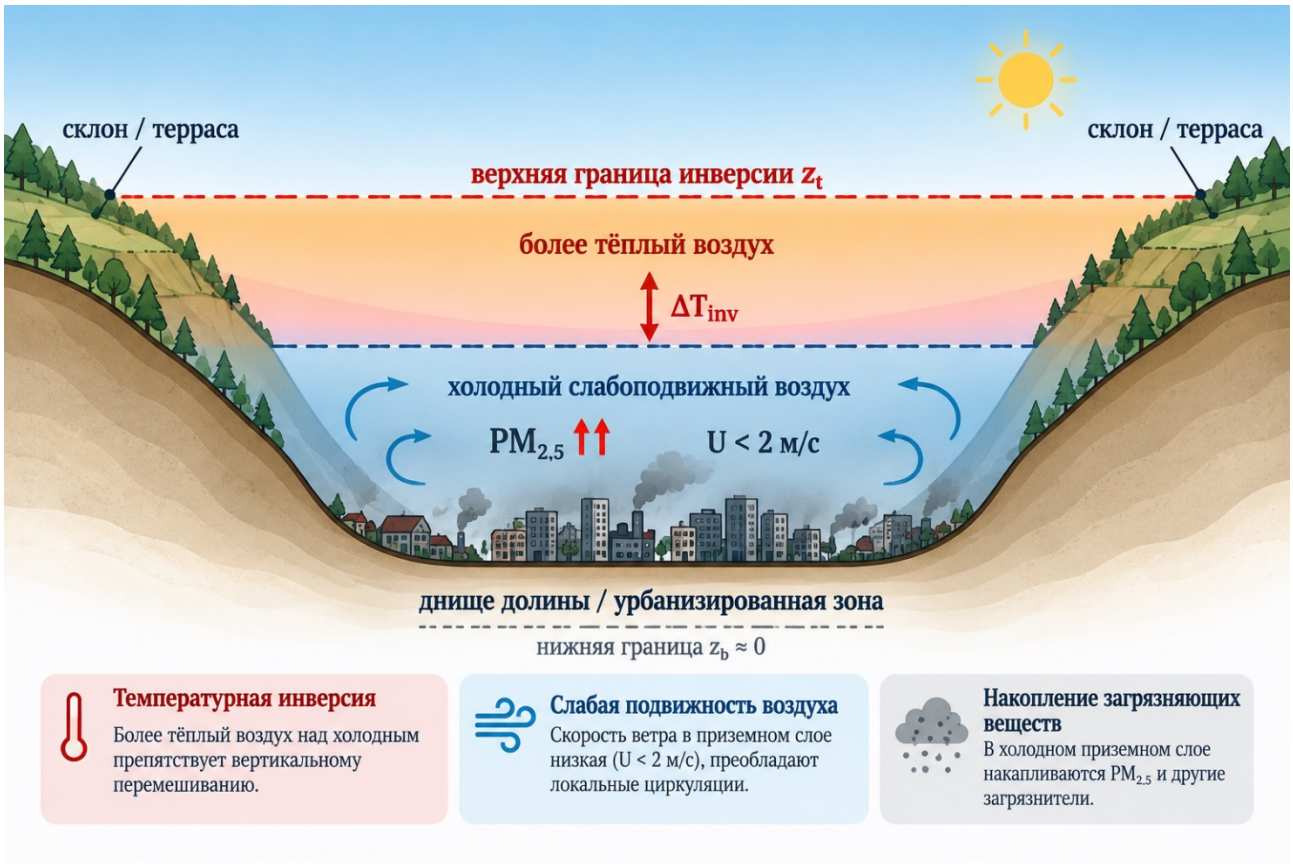


Рисунок 1 — Схема формирования слоя накопления $PM_{2.5}$ при низкой температурной инверсии (источник: составлено автором по [1, 2, 4, 7])

Именно положение нижней границы меняет экологический смысл инверсии. Когда z_b близка к поверхности, загрязняющие примеси оказываются внутри холодного воздушного бассейна. Слабый ветер не обеспечивает достаточного горизонтального переноса, а устойчивый температурный профиль подавляет вертикальное движение. При разрушении инверсии или усилении ветра система переходит в иное состояние: доступный для перемешивания объем возрастает, и при неизменной эмиссии концентрация у поверхности начинает снижаться. Сходная последовательность установлена и в зарубежных бассейновых городах, где изменение синоптического режима может за короткое время привести к переходу от устойчивого накопления загрязнений к их рассеиванию [12].

Влияние котловинного рельефа при этом нельзя сводить к образному представлению о городе как о «чаше». Реальный городской рельеф неоднороден. Днище долины, нижние террасы, локальные понижения, речной коридор, склоны

и более высокие участки различаются по доступности ветрового переноса. Плотная застройка дополнительно меняет шероховатость поверхности. Поэтому концентрационное поле $PM_{2.5}$ даже во время единого общегородского инверсионного эпизода должно оставаться пространственно неоднородным.

Положение мониторингового поста в такой системе становится частью интерпретации, а не технической деталью. С. В. Михайлюта и А. А. Леженин показали, что пункты наблюдений Красноярска характеризуются различающимися условиями проветриваемости [5]. Если станция расположена в пространстве, где локальная застройка или форма рельефа ослабляет ветер, зафиксированная концентрация может превышать значения на открытом участке при той же фоновой стратификации. Обратная ситуация возможна возле хорошо продуваемого коридора.

Енисей вносит дополнительную неоднородность. Незамерзающая водная поверхность существенно отличается от окружающей суши по тепловому режиму. Измерения вертикальной температуры показали, что зимой различие между речным и урбанизированным участками меняет знак с высотой [9]. Следовательно, термическое воздействие реки не ограничивается тонким приземным слоем. В отдельных ситуациях оно может влиять на нижнюю часть температурного профиля и тем самым менять локальную устойчивость атмосферы. Для геоэкологического картирования это означает необходимость выделять речную долину самостоятельной топоклиматической единицей, а не включать ее в единую категорию с прилегающей застройкой.

Результаты, относящиеся к LST, требуют иной трактовки. Спутниковая сцена способна показать, какие поверхности охлаждены или прогреты сильнее, где сосредоточены техногенные тепловые аномалии и как меняется температура земной поверхности вдоль градиента «центр — периферия». Но из такой карты невозможно непосредственно определить высоту инверсии. Тем более нельзя заключить, что участок с более высокой LST обязательно имеет более загрязненный воздух. Сопоставление спутниковых продуктов, выполненное А.

Hurduc с соавторами, показывает существенную зависимость характеристик SUHI от используемого набора LST [8]. В работе A. Cecilia и соавторов температура воздуха восстанавливается из спутниковой LST лишь после обучения модели на наземных измерениях [14]. Эти результаты подтверждают необходимость рассматривать тепловой остров как дополнительный пространственный показатель, но не использовать его вместо вертикального профиля атмосферы.

Такое разграничение меняет постановку причинного вопроса. Вместо формулы «остров тепла усиливает загрязнение» следует проверять, как поверхность воздействует на конкретный эпизод стратификации. В ясную морозную ночь сильное охлаждение отдельных участков может поддерживать сток более холодного воздуха в понижения. Днем прогрев поверхности, напротив, способен ослабить устойчивость нижнего слоя. Техногенно прогретые участки также могут локально изменять тепловой баланс, но итог зависит от мощности вышележащей инверсии. Поэтому SUHI нельзя априори считать ни ухудшающим, ни улучшающим фактором качества воздуха.

Полученные зависимости позволяют предложить типологию атмосферных ситуаций, ориентированную не на одно измерение, а на совместный учет нескольких физически различающихся характеристик.

Таблица 2 — Типология зимних атмосферных состояний Красноярска по риску накопления $PM_{2.5}$

Тип ситуации	Вертикальная структура и ветер	Ожидаемое поведение $PM_{2.5}$	Геоэкологическая оценка
Вентилируемая	устойчивая низкая инверсия отсутствует либо быстро разрушается; ветер достаточен для горизонтального обмена	продолжительное удержание высоких концентраций маловероятно; локальные пики быстрее рассеиваются	низкий риск накопления
Переходная слабоустойчивая	формируется устойчивость нижнего слоя, но инверсия непродолжительна или сохраняется заметный горизонтальный перенос	возможен рост $PM_{2.5}$, однако эпизод ограничен по длительности	умеренный риск

Низкая приземная инверсия	нижняя граница у поверхности; инверсионный слой охватывает нижние ~100–150 м; ветер менее 2 м/с	выраженное накопление, медленное снижение концентрации, рост пространственных контрастов	высокий риск
Интенсивная низкая инверсия при длительном штиле	устойчивый холодный воздушный бассейн; слабый ветер сохраняется продолжительное время; температурный перепад значителен	возможно формирование наиболее тяжелых и длительных эпизодов загрязнения	критический риск
Приподнятая инверсия	инверсионный слой расположен выше приземного слоя; под ним сохраняется некоторый объем перемешивания	результат зависит от высоты нижней границы и ветра; высокая интенсивность инверсии не гарантирует пикового $PM_{2.5}$	переменный, от умеренного до высокого
Разрушение инверсии	усиление ветра, изменение синоптической ситуации, увеличение глубины перемешивания	концентрации снижаются по мере восстановления вертикального и горизонтального обмена	быстро уменьшающийся риск

Источник: составлено автором по [1, 2, 4, 7, 10, 12].

Предлагаемая типология отличается от бинарной классификации тем, что допускает одинаковую интенсивность температурной инверсии при разном экологическом результате. Например, приподнятый слой может оказаться менее опасным, чем слабее выраженная приземная инверсия. Тем самым основным параметром становится сочетание геометрии устойчивого слоя с характеристиками воздухообмена.

Наглядно различие между спутниковым и атмосферным блоками представлено на рисунке 2.

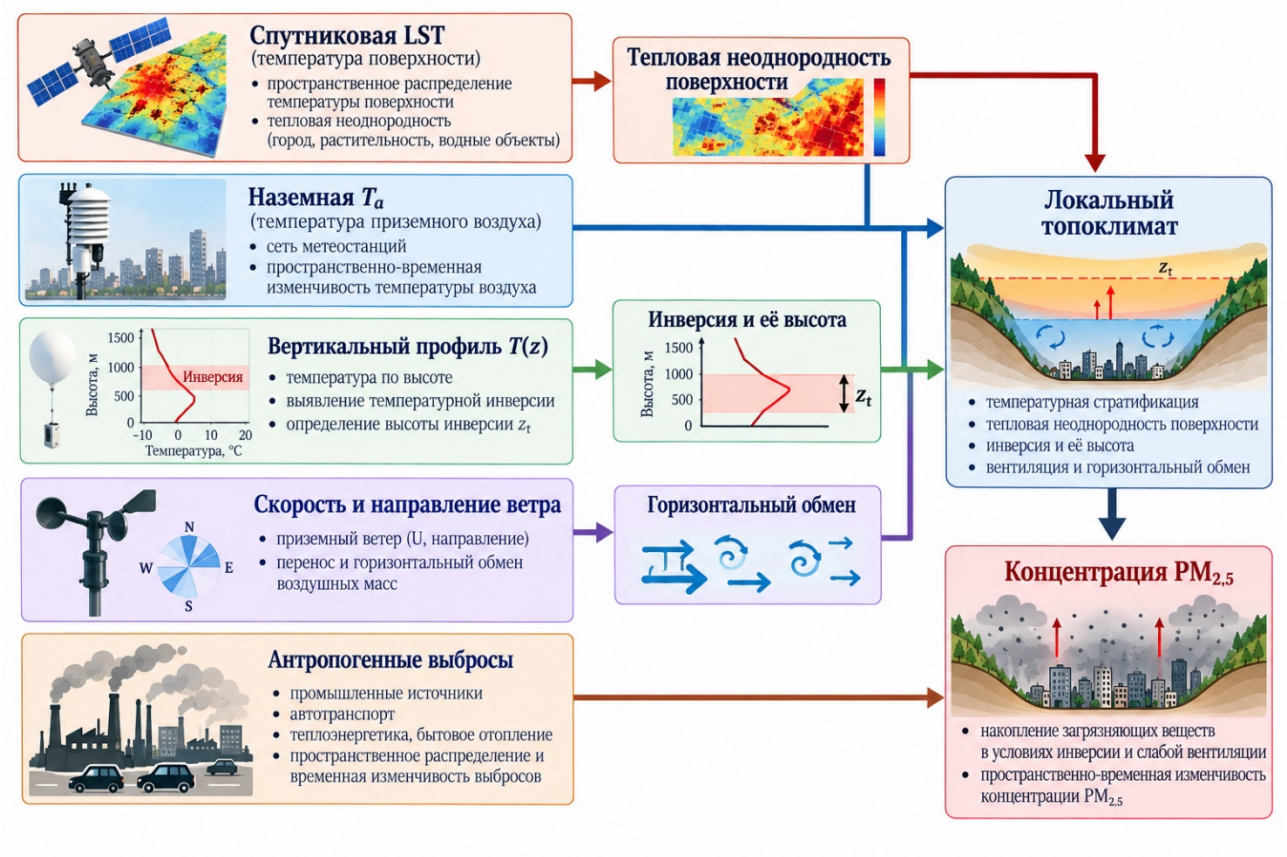


Рисунок 2 — Разделение каналов формирования тепловой неоднородности и загрязнения (источник: разработано автором)

Схема подчеркивает, почему спутниковая температура не должна располагаться в причинной цепочке на месте температуры воздуха. Она описывает одно из граничных условий теплообмена между поверхностью и атмосферой. Степень удержания загрязняющих веществ определяется профилем T(z), ветром и глубиной слоя, доступного для перемешивания.

Отдельного рассмотрения требует временной масштаб. Годовое среднее содержание $PM_{2.5}$ может оставаться относительно умеренным и при этом скрывать короткие, но экологически значимые зимние эпизоды. Региональные материалы по состоянию окружающей среды фиксируют устойчивую проблему загрязнения атмосферного воздуха Красноярска; при этом разные загрязнители и разные показатели нормативной оценки дают неодинаковую картину. Это еще раз показывает ограниченность годового среднего для исследования инверсионного механизма. Для настоящей задачи содержательнее длительность эпизода, максимальная часовая или суточная концентрация и скорость снижения

$PM_{2.5}$ после изменения метеорологических условий.

С практической точки зрения важен и вопрос качества высокочастотного мониторинга. Оптические датчики позволяют получить плотную пространственную сеть, что существенно для неоднородного городского рельефа. Но высокая плотность точек не компенсирует систематическую измерительную ошибку. Красноярская работа по сопоставлению CityAir и E-BAM показывает, что корректирующие коэффициенты должны учитывать сезон и метеорологическое состояние [3]. Поэтому пространственная карта $PM_{2.5}$ приобретает геоэкологический смысл лишь после приведения измерительных рядов к сопоставимой основе.

В рамках территориального планирования результаты не следует сводить к рекомендации «не строить в низинах». Морфология городской территории взаимодействует с направлением ветра, высотой источника выбросов, шероховатостью застройки и существующими транспортными потоками. Тем не менее участки, где рельеф и застройка систематически ослабляют обмен, объективно требуют более строгой оценки при размещении новых источников эмиссии. Такая оценка должна проводиться с учетом повторяемости зимних слабоветренных и инверсионных режимов.

Таблица 3 — Геоэкологическая интерпретация основных морфологических позиций городской территории

Морфологическая или функциональная позиция	Основная особенность	Возможный риск в инверсионный период	Приоритет мониторинга и планирования
Днище долины и локальные понижения	склонность к накоплению холодного воздуха	длительное удержание примесей при приземной инверсии	повышенная плотность наблюдений; учет инверсий при оценке новых источников
Плотно застроенные слабопроветриваемые участки	локальное снижение скорости ветра	усиление пространственного контраста $PM_{2.5}$	анализ микромасштабной вентиляции до интерпретации данных поста
Речной коридор Енисея	специфическое зимнее тепловое воздействие незамерзающей воды	эффект зависит от высоты и текущей стратификации	отдельное профилеметрическое наблюдение;

			недопустимость упрощенной трактовки как постоянного вентиляционного коридора
Склоны и верхние террасы	иная экспозиция к ветровому переносу и катабатическим потокам	локально меньшая склонность к накоплению, но высокая зависимость от направления переноса	размещение фоновых и сравнительных постов
Промышленные и транспортные узлы	высокая локальная эмиссионная нагрузка	особенно высокий риск при совпадении источника с низкой инверсией и слабым ветром	совместный учет эмиссии и топоклиматической ситуации
Переходные зоны между днищем и склонами	изменение шероховатости и рельефа на малом расстоянии	резкие пространственные градиенты концентраций	детализированное картирование, мобильные измерения

Источник: разработано автором на основе [1, 5, 7, 9].

Геоэкологический подход в данном случае состоит не в поиске единственного «главного» фактора загрязнения. Рельеф не производит $PM_{2.5}$, инверсия также не производит частицы, а эмиссионная нагрузка сама по себе не определяет концентрацию у конкретного поста. Наблюдаемое качество воздуха определяется сочетанием характеристик источников выбросов и состояния атмосферы, в которой происходит рассеивание примесей. Именно поэтому одинаковая интенсивность выбросов в соседние дни способна приводить к резко различающимся уровням загрязнения.

Сопоставление с зарубежными исследованиями позволяет оценить общность выявленного механизма, но не дает оснований переносить на Красноярск чужие количественные доли источников. В альпийской долине Masiol с соавторами получили конкретное распределение зимнего $PM_{2.5}$ между источниками [6]; в другой урбанизированной котловине Zhang с соавторами исследовали взаимодействие аэрозоля с пограничным слоем [2]. Для Красноярска эти публикации ценны как методические аналоги. Их численные результаты характеризуют другие эмиссионные системы и климатические

условия. Такая граница применимости необходима, поскольку внешне сходная морфология рельефа не делает города геоэкологически тождественными.

Полученная схема позволяет иначе интерпретировать понятие неблагоприятной метеорологической ситуации. Для задач оперативного мониторинга предупреждающим признаком должно быть приближение к комплексу условий: низкая нижняя граница устойчивого слоя, малая глубина эффективного перемешивания, слабый ветер и достаточная длительность режима. Если одновременно начинает расти $PM_{2.5}$ на нескольких приведенных к сопоставимому уровню станциях, вероятность формирования общегородского эпизода становится значительно выше, чем при одиночном превышении на локально экранированном посту.

Совмещение наблюдений за вертикальной температурной стратификацией, приземным ветром и концентрациями $PM_{2.5}$ может стать основой системы предварительного выявления неблагоприятных метеорологических условий. Однако переход от концептуальной типологии к оперативному прогнозу требует формирования синхронизированного массива наблюдений, выбора временного горизонта и независимой проверки частоты правильных и ложных предупреждений.

Выводы. Геоэкологическая специфика атмосферного загрязнения Красноярска определяется совместным действием антропогенной нагрузки и топоклиматических условий долинно-котловинной территории. Рельеф формирует пространственные предпосылки слабого воздухообмена, однако не объясняет конкретный эпизод повышенного $PM_{2.5}$. Для этого необходимо учитывать текущую вертикальную структуру атмосферы, скорость ветра и положение наблюдательного пункта.

Наиболее неблагоприятный режим связан с приземными и низко расположенными инверсиями, охватывающими нижние приблизительно 100–150 м, особенно если они сочетаются со скоростью ветра менее 2 м/с. В таких условиях загрязняющие вещества поступают в ограниченный объем

слабоподвижного воздуха, а процессы горизонтального и вертикального обмена одновременно ослабевают. Продолжительность состояния становится не менее важной, чем температурная разность внутри инверсии.

Сильная приподнятая инверсия не может рассматриваться как самостоятельный надежный предиктор высокого $PM_{2.5}$. Ее влияние определяется высотой нижней границы и состоянием расположенного ниже слоя. Этот результат требует отказаться от бинарного деления атмосферных ситуаций по признаку наличия инверсии и использовать параметры геометрии устойчивого слоя — его высоту, мощность и интенсивность.

Поверхностный городской остров тепла следует анализировать отдельно. Спутниковая LST характеризует термическое состояние земной поверхности, но не заменяет температуру воздуха и не дает прямой информации о вертикальном температурном профиле. Влияние городской тепловой неоднородности на загрязнение может менять знак в зависимости от времени суток и устойчивости вышележащих слоев. Поэтому связь между SUHI, инверсией и $PM_{2.5}$ должна устанавливаться эмпирически.

Енисей образует самостоятельный топоклиматический элемент городской территории. Современные вертикальные измерения фиксируют изменение характера температурных различий между речным и урбанизированным участками с высотой. Данное обстоятельство делает некорректным представление речного коридора как неизменно благоприятного либо неизменно неблагоприятного для рассеивания загрязнений; его функцию необходимо оценивать в рамках конкретного атмосферного эпизода.

Предложенная типология геоэкологического риска соединяет вертикальную стратификацию, ветровой режим и положение участка в рельефе. Она позволяет перейти от констатации повышенной концентрации к объяснению условий, при которых загрязнение сохраняется. Для территориального планирования такой подход означает необходимость учитывать повторяемость зимних инверсионных и слабоветренных режимов при оценке новых источников

эмиссии, а для мониторинга — различать общегородскую атмосферную ситуацию и локальный эффект микрорельефа и застройки.

Дальнейшее развитие исследования целесообразно связывать с синхронным анализом непрерывных рядов $PM_{2.5}$, вертикальных температурных профилей, высоты пограничного слоя и трехмерного ветрового поля. Следующим содержательным этапом может стать построение пространственно-временной модели риска, прогнозирующей вероятность превышения заданного уровня $PM_{2.5}$ на горизонте нескольких часов. Для разделения вклада отдельных источников потребуется иной массив данных — детализированный кадастр выбросов, химическая характеристика аэрозоля и модель атмосферного переноса.

Список литературы

1. Шапарев Н. Я., Токарев А. В., Якубайлик О. Э. Формирование зимних температурных инверсий в атмосфере г. Красноярска и их последствия // Оптика атмосферы и океана. 2026. Т. 39. № 6. С. 520–527. DOI: 10.15372/AOO20260609.
2. Zhang M., Tian P., Zhao Y. et al. Impact of aerosol-boundary layer interactions on PM2.5 pollution during cold air pool events in a semi-arid urban basin // Science of the Total Environment. 2024. Vol. 922. Article 171225. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.171225.
3. Карепова Е. Д., Петракова В. С. Статистически обоснованная корректировка показаний датчиков станций CityAir уровня концентрации взвешенных частиц PM2.5 в приземном слое атмосферы города // Информатика и автоматизация. 2024. Т. 23. № 2. С. 352–376. DOI: 10.15622/ia.23.2.2.
4. Cordeiro A. M. R. Formation and Dynamics of Night-Time Cold Air Pools in Peri-Urban Topographic Basins: A Case Study of Coimbra, Portugal // Meteorology. 2025. Vol. 4. Article 4. DOI: 10.3390/meteorology4010004.
5. Михайлюта С. В., Леженин А. А. Проветриваемость мест размещения постов мониторинга загрязнения атмосферного воздуха на территории г. Красноярска // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. 2025. С. 106–111. DOI: 10.33764/2618-981X-2025-4-

106-111.

6. Masiol M., Formenton G., Visin F. et al. Sources of wintertime PM2.5 at a major city in an Alpine Valley: The role of atmospheric dispersion and inversion dynamics // Atmospheric Environment. 2024. Vol. 330. Article 120556. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2024.120556.

7. Малимонов М. И., Заворуев В. В., Якубайлик Т. В., Якубайлик О. Э. Программно-технологическое обеспечение для мониторинга температурных инверсий и загрязнения атмосферы Красноярска // Южно-Сибирский научный вестник. 2025. Т. 64. Вып. 6. С. 179–184. DOI: 10.25699/SSSB.2025.64.6.029.

8. Hurduc A., Ermida S. L., DaCamara C. C. On the Suitability of Different Satellite Land Surface Temperature Products to Study Surface Urban Heat Islands // Remote Sensing. 2024. Vol. 16. No. 20. Article 3765. DOI: 10.3390/rs16203765.

9. Yakubailik O. E., Zavoruev V. V., Yakubailik T. V. Measurement and Analysis of Vertical Temperature Profiles of the Atmosphere over the Yenisei River and the Urbanized Area of Krasnoyarsk // Technical Physics. 2025. Vol. 70. No. 12. P. 634–639. DOI: 10.1134/S1063784225700549.

10. Zhu Z., Li H., Fan S., Xu W., Fang R., Liu B., Gong W. The covariability between temperature inversions and aerosol vertical distribution over China // Atmospheric Pollution Research. 2024. Vol. 15. No. 1. Article 101959. DOI: 10.1016/j.apr.2023.101959.

11. Министерство экологии Красноярского края. Государственный доклад «О состоянии и охране окружающей среды в Красноярском крае в 2024 году». Красноярск, 2025.

12. Liang Q., Miao Y., Yan Y., Liu S. Winter PM2.5 pollution in China's largest arid urban agglomeration: Impacts of basin terrain and synoptic-scale circulations // Atmospheric Research. 2026. Vol. 332. Article 108728. DOI: 10.1016/j.atmosres.2025.108728.

13. ФИЦ КНЦ СО РАН. Система мониторинга состояния атмосферного воздуха в г. Красноярске: данные о концентрации $PM_{2.5}$ и метеорологических

параметрах. Электронный информационный ресурс. 2026.

14. Cecilia A., Casasanta G., Petenko I., Argentini S. A Machine Learning Algorithm to Convert Geostationary Satellite LST to Air Temperature Using In Situ Measurements: A Case Study in Rome and High-Resolution Spatio-Temporal UHI Analysis // Remote Sensing. 2025. Vol. 17. No. 3. Article 468. DOI: 10.3390/rs17030468.

References

1. Shaparev N. Ya., Tokarev A. V., Yakubajlik O. E`. Formirovanie zimnix temperaturny`x inversij v atmosfere g. Krasnoyarska i ix posledstviya // Optika atmosfery` i okeana. 2026. T. 39. № 6. S. 520–527. DOI: 10.15372/AOO20260609.

2. Zhang M., Tian P., Zhao Y. et al. Impact of aerosol-boundary layer interactions on PM2.5 pollution during cold air pool events in a semi-arid urban basin // Science of the Total Environment. 2024. Vol. 922. Article 171225. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.171225.

3. Karepova E. D., Petrakova V. S. Statisticheski obosnovannaya korrektirovka pokazanij datchikov stancij CityAir urovnya koncentracii vzveshenny`x chasticz PM2.5 v prizemnom sloe atmosfery` goroda // Informatika i avtomatizaciya. 2024. T. 23. № 2. S. 352–376. DOI: 10.15622/ia.23.2.2.

4. Cordeiro A. M. R. Formation and Dynamics of Night-Time Cold Air Pools in Peri-Urban Topographic Basins: A Case Study of Coimbra, Portugal // Meteorology. 2025. Vol. 4. Article 4. DOI: 10.3390/meteorology4010004.

5. Mixajlyuta S. V., Lezhenin A. A. Provetrivaemost` mest razmeshheniya postov monitoringa zagryazneniya atmosfernogo vozduxa na territorii g. Krasnoyarska // Intere`kspo GEO-Sibir`. 2025. S. 106–111. DOI: 10.33764/2618-981X-2025-4-106-111.

6. Masiol M., Formenton G., Visin F. et al. Sources of wintertime PM2.5 at a major city in an Alpine Valley: The role of atmospheric dispersion and inversion dynamics // Atmospheric Environment. 2024. Vol. 330. Article 120556. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2024.120556.

7. Malimonov M. I., Zavoruev V. V., Yakubajlik T. V., Yakubajlik O. E`. Programmno-texnologicheskoe obespechenie dlya monitoringa temperaturny`x inversij i zagryazneniya atmosfery` Krasnoyarska // Yuzhno-Sibirskij nauchny`j vestnik. 2025. T. 64. Vy`p. 6. S. 179–184. DOI: 10.25699/SSSB.2025.64.6.029.

8. Hurduc A., Ermida S. L., DaCamara C. C. On the Suitability of Different Satellite Land Surface Temperature Products to Study Surface Urban Heat Islands // Remote Sensing. 2024. Vol. 16. No. 20. Article 3765. DOI: 10.3390/rs16203765.

9. Yakubailik O. E., Zavoruev V. V., Yakubailik T. V. Measurement and Analysis of Vertical Temperature Profiles of the Atmosphere over the Yenisei River and the Urbanized Area of Krasnoyarsk // Technical Physics. 2025. Vol. 70. No. 12. P. 634–639. DOI: 10.1134/S1063784225700549.

10. Zhu Z., Li H., Fan S., Xu W., Fang R., Liu B., Gong W. The covariability between temperature inversions and aerosol vertical distribution over China // Atmospheric Pollution Research. 2024. Vol. 15. No. 1. Article 101959. DOI: 10.1016/j.apr.2023.101959.

11. Ministerstvo e`kologii Krasnoyarskogo kraya. Gosudarstvenny`j doklad «O sostoyanii i oxrane okruzhayushhej sredy` v Krasnoyarskom krae v 2024 godu». Krasnoyarsk, 2025.

12. Liang Q., Miao Y., Yan Y., Liu S. Winter PM2.5 pollution in China's largest arid urban agglomeration: Impacts of basin terrain and synoptic-scale circulations // Atmospheric Research. 2026. Vol. 332. Article 108728. DOI: 10.1016/j.atmosres.2025.108728.

13. FICz KNCz SO RAN. Sistema monitoringa sostoyaniya atmosfernogo vozduxa v g. Krasnoyarske: danny`e o koncentracii $PM_{2.5}$ i meteorologicheskix parametrax. E`lektronny`j informacionny`j resurs. 2026.

14. Cecilia A., Casasanta G., Petenko I., Argentini S. A Machine Learning Algorithm to Convert Geostationary Satellite LST to Air Temperature Using In Situ Measurements: A Case Study in Rome and High-Resolution Spatio-Temporal UHI Analysis // Remote Sensing. 2025. Vol. 17. No. 3. Article 468. DOI:

10.3390/rs17030468.

Статья поступила в редакцию 18.06.2026; одобрена после рецензирования 30.07.2026; принята к публикации 12.10.2026.

The article was submitted 18.06.2026; approved after peer review 30.07.2026; accepted for publication 12.10.2026.