

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра метеорологии и климатологии

Метеорологический потенциал самоочищения атмосферного

воздуха в Поволжье в последние десятилетия

АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ

студентки 2 курса 215 группы

направления 05.04.05 Прикладная гидрометеорология

код и наименование направления

географического факультета

наименование факультета, института, колледжа

Петровой Алины Андреевны

фамилия, имя, отчество

Научный руководитель

доцент, к.г.н.

должность, уч. степень, уч. звание

Н.В. Короткова

инициалы, фамилия

И.о. зав. кафедрой

к.г.н., доцент

должность, уч. степень, уч. звание

М.Ю. Червяков

инициалы, фамилия

Саратов 2026

Введение. С развитием науки и технологии человечество получило возможность использовать природные ресурсы для достижения своих материальных и духовных целей. Научно-технический прогресс, несмотря на многочисленные положительные аспекты, также привёл к возникновению ряда проблем, связанных с ухудшением экологической обстановки. Ускоренное развитие технологий и нерациональное использование ресурсов оказывают деструктивное воздействие на природную среду, которая является фундаментальной основой существования жизни на Земле.

Экологическая проблема приобретает всё более острый характер: наблюдается загрязнение атмосферы, гидросферы и литосферы, истощение природных ресурсов, а также деградация экосистем. Это выражается в снижении качества почвенного покрова, изменении гидрологических режимов и сокращении биологического разнообразия.

Разрушение благоприятного состояния природной среды происходит настолько быстрыми темпами, что естественная самовосстанавливающаяся сила природы не успевает адаптироваться к возникающим под воздействием человеческого вмешательства изменениям, и в её состоянии возникает опасный дисбаланс, грозящий природными катастрофами, которые мы в последнее время всё чаще наблюдаем [1].

В Приволжском регионе фиксируется значительное ухудшение экологической ситуации, проявляющееся в существенном загрязнении атмосферного воздуха и водных ресурсов. Уровень атмосферного загрязнения в Поволжье сопоставим с показателями, характерными для Центрального региона Российской Федерации. Основными факторами, способствующими ухудшению качества атмосферного воздуха в данном регионе, являются объекты теплоэнергетической, машиностроительной, химической, транспортной и нефтехимической отраслей промышленности, а также разветвлённая сеть трубопроводного транспорта.

В данной работе проведен анализ метеорологического потенциала самоочищения атмосферы в крупных городах Поволжского региона: Казани,

Саратове и Астрахани. Предметом исследования являлись метеорологические факторы, влияющие на качество атмосферного воздуха в указанных городах в период с 1980 по 2025 годы. Целью исследования было выявление особенностей метеорологического режима и оценка способности крупных городов Поволжья к самоочищению.

Основное содержание работы. Качество атмосферного воздуха определяется не только объёмом и составом выбросов загрязняющих веществ, но и комплексом метеорологических факторов. Даже при неизменном уровне антропогенного воздействия, исходящего от промышленных предприятий, транспортных средств, объектов энергетики и других источников, концентрация вредных примесей в приземном слое атмосферы может значительно варьироваться. Ключевую роль в этих изменениях играют метеорологические условия. К числу ключевых метеорологических факторов относятся скорость и направление ветра, температурные инверсии, влажность, осадки, атмосферное давление и интенсивность солнечной радиации.

Влияние скорости и направления ветра на загрязнение. Ветровой режим играет ключевую роль в процессе самоочищения атмосферы, оказывая влияние на турбулентную диффузию, осаждение загрязняющих веществ и химические реакции.

В каждом городе, а также в различных его районах, под воздействием физико-географических факторов и особенностей урбанистической структуры формируется уникальный ветровой режим, который существенно отличается от фонового ветра. Концентрация загрязняющих веществ в атмосфере зависит от направления, скорости ветра и расположения источников выбросов.

Обязательно учитывать не только направление, но и скорость ветра. Выбросы, исходящие из низких и неорганизованных источников в условиях слабого ветра, представляют значительную угрозу для населения, так как они накапливаются в приземном слое атмосферы, что приводит к формированию высоких концентраций загрязняющих веществ. Экспериментальные данные

свидетельствуют о том, что максимальные концентрации примесей в городских условиях наблюдаются при скорости ветра в диапазоне 0-1 м/с [3, 4].

Влияние инверсий и изотермии температуры на загрязнение. Наличие инверсии температуры способствует формированию неблагоприятной погодной ситуации, характеризующей особенностями стратификации нижнего слоя тропосферы. Приземные и приподнятые инверсии температуры, обладающие устойчивой стратификацией, создают задерживающие слои, препятствующие вертикальному переносу атмосферных примесей.

В городских условиях, при наличии большого количества низких источников выбросов, приподнятые инверсии способствуют накоплению примесей, особенно если температура выбросов ниже температуры окружающего воздуха [3, 4, 8].

В зависимости от распределения источников выбросов по территории города влияние инверсии может увеличиваться или уменьшаться. Большую опасность представляют застои воздуха. «Застойной» считается ситуация, когда приземная инверсия температуры наблюдается при скорости ветра 0-1 м/с. Такие ситуации обычно связаны с крупномасштабными атмосферными процессами, чаще всего антициклонами [3, 9].

Влияние осадков на формирование уровня загрязнения. Атмосферные условия, способствующие самоочищению атмосферы, характеризуются высокой частотой выпадения осадков. Эффективность процесса очищения воздуха увеличивается с увеличением количества выпадающих осадков. Ливневые осадки оказывают более значительное воздействие на очищение атмосферы по сравнению с обложными осадками.

Влияние туманов на формирование уровня загрязнения. В условиях туманов возрастает накопление примесей в атмосфере, обусловленное слабыми ветрами и инверсиями в большой толще атмосферы. Капли тумана поглощают вредные вещества и способствуют накоплению в данном месте, примесей из весьма протяженного слоя, что существенно увеличивает суммарное загрязнение

воздуха вблизи подстилающей поверхности. При растворении примесей иногда образуются новые более вредные вещества.

Потенциал загрязнения атмосферы. Э. Ю. Безуглой [12, 13] был предложен показатель потенциала загрязнения атмосферы (ПЗА). Этот показатель основан на использовании климатической информации и позволяет оценить, во сколько раз средний уровень загрязнения воздуха в конкретном районе, обусловленный фактической повторяемостью метеорологических условий, превышает аналогичный показатель в условном районе при тех же уровнях выбросов. В качестве условного района рассматривается район с минимальными уровнями выбросов.

$$\text{ПЗА} = g_i/g_o , \quad (1.1)$$

где: g_i – средняя концентрация примесей в конкретном районе; g_o – средняя концентрация примесей в условном районе.

По потенциалу загрязнения атмосферы (ПЗА) территория России делится на пять зон. Северо-западные регионы Европейской части России относятся к зоне с самым низким потенциалом загрязнения атмосферы. Здесь ПЗА не превышает 2,4 единицы. В центральной части Европейской России расположена зона с умеренным потенциалом загрязнения атмосферы. Показатели ПЗА здесь варьируются от 2,4 до 2,7 единицы. Зона с повышенным потенциалом загрязнения атмосферы включает отдельные регионы Европейской части России и Западной Сибири. Значения ПЗА находятся в диапазоне от 2,7 до 3,0 единицы. Крупные города Урала и Сибири находятся в зоне с высоким потенциалом загрязнения атмосферы. Показатели ПЗА достигают значений от 3,0 до 3,3 единицы. Восточная Сибирь, территории Крайнего Севера и Дальний Восток образуют зону с очень высоким потенциалом загрязнения атмосферы. Значения ПЗА здесь превышают 3,3 единицы.

Организация наблюдений за загрязнением атмосферы. Наблюдение за уровнем загрязнения атмосферного воздуха в городах является важной задачей,

которая возложена на территориальные подразделения Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет), Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека (Роспотребнадзор), а также на предприятия, чья деятельность оказывает негативное воздействие на атмосферную среду.

В Приволжском регионе фиксируется значительное ухудшение экологической ситуации, проявляющееся в существенном загрязнении атмосферного воздуха и водных ресурсов. Уровень атмосферного загрязнения в Поволжье сопоставим с показателями, характерными для Центрального региона Российской Федерации. Основными факторами, способствующими ухудшению качества атмосферного воздуха в данном регионе, являются объекты теплоэнергетической, машиностроительной, химической, транспортной и нефтехимической отраслей промышленности, а также разветвлённая сеть трубопроводного транспорта.

Казань – крупный промышленный центр России, где сосредоточены предприятия различных отраслей, включая машиностроение, химическую и нефтехимическую промышленность, авиастроение, фармацевтику, лёгкую и пищевую промышленность. Город играет ключевую роль в экономике Татарстана и страны в целом, обеспечивая значительную долю промышленного производства региона. Основные источники загрязнения атмосферы: предприятия химии, машиностроения и металлообработки, по производству стройматериалов, ТЭЦ, а также автомобильный, железнодорожный и речной транспорт. Наиболее крупные предприятия расположены в правобережной части города.

Саратов является областным центром, крупным промышленным городом. Основными источниками загрязнения атмосферы являются: предприятия по производству электроэнергии, газа и воды, транспорта и связи, по производству нефтепродуктов, предприятия химической, нефтехимической, нефтеперерабатывающей, пищевой, деревообрабатывающей промышленности, предприятий обрабатывающего производства, более 70% суммарных выбросов

поступает от автотранспорта. Мониторинг состояния воздушной среды города осуществляют 6 пунктов наблюдения. Основная доля выбросов промышленных предприятий в атмосферу города приходится на ООО «Саратоворгсинтез», ОАО «Саратовский нефтеперерабатывающий завод» и др.

Астрахань также является крупным промышленным центром, основными источниками загрязнения воздушной среды являются предприятия теплоэнергетики, нефтехимической, топливной, лесной промышленности, производства строительных материалов, рыбного хозяйства, а также железнодорожный, водный и автомобильный транспорт. Предприятия расположены по берегам р.Волги. Уровень загрязнения воздуха оценивается как повышенный, среднегодовые концентрации диоксида азота и формальдегида превышают ПДК. На территории города организовано 5 постов наблюдений.

Наблюдения за качеством атмосферного воздуха в городах осуществляется в соответствии с неполной программой в 07, 13 и 19 часов местного времени, включающей измерения концентраций аммиака, диоксида азота, формальдегида, фторида водорода, бензапирена, диоксида серы, оксида углерода, взвешенных веществ и других специфических загрязняющих веществ.

Метеорологический потенциал самоочищения атмосферы.

Атмосферная среда обладает способностью к самоочищению, которая реализуется через процессы переноса, рассеивания и удаления примесей. Эффективность этих процессов определяется множеством факторов, среди которых ключевую роль играют метеорологические условия. Уровень загрязнения атмосферного воздуха зависит от наличия промышленных предприятий и автотранспорта, являющихся основными источниками выбросов загрязняющих веществ, а также от метеорологических характеристик, влияющих на перенос, рассеивание и вымывание этих веществ.

Антропогенные выбросы, попадая в атмосферу, вымываются атмосферными осадками и переносятся ветрами на значительные расстояния от мест их первоначального выброса. В связи с этим, для обеспечения

экологической безопасности городской среды необходимо учитывать роль метеорологических факторов в процессах самоочищения атмосферы [3,28].

Установлено [29], что скорость ветра, при которой вредные вещества выносятся из города, должна быть не менее 6 м/с.

Осадками, способными очистить атмосферу от загрязнения, считается величина $\geq 0,5$ мм в сутки.

Анализ годового хода метеорологических величин, характеризующих условия накопления и рассеивания примесей, позволяет оценить их вклад в формирование уровня загрязнения.

С учетом данных условий, Т.С. Селегей [28] был разработан показатель, позволяющий оценить рассеивающую способность атмосферы – метеорологический потенциал атмосферы (МПА):

$$\text{МПА} = K = \frac{P_{\text{ш}} + P_{\text{т}}}{P_{\text{о}} + P_{\text{в}}} \quad (3.1)$$

где $P_{\text{ш}}$, $P_{\text{т}}$, $P_{\text{о}}$, $P_{\text{в}}$ – повторяемость штилей (скоростей ветра 0-1 м/с), повторяемость дней с туманом, дней с осадками ($\geq 0,5$ мм) и скоростей ветра > 6 м/с.

В зависимости от климатических условий исследуемого района меняется одно слагаемое, для тех районов, где часто наблюдаются туманы, неблагоприятными условиями являются повторяемость штилей и туманов. Так как в Поволжье и в других отдельных районах нашей страны повторяемость числа дней с туманами невелика, в качестве неблагоприятных условий для рассеивания примесей рассматриваются повторяемость штилей и инверсий (приземных задерживающих слоев - ПЗС). С учетом особенностей климатических условий Поволжья формула расчета коэффициента самоочищения атмосферы будет выглядеть следующим образом:

$$K' = \frac{P_{\text{в}} + P_{\text{о}}}{P_{\text{ин}} + P_{\text{ш}}} \quad (3.3)$$

где $P_{ш}$, $P_{ин}$, P_o , P_v – повторяемость скоростей ветра 0–1 м/с, дней с инверсией, дней с осадками $\geq 0,5$ мм и скоростей ветра ≥ 6 м/с соответственно.

При $K' \leq 0,25$ складываются условия крайне неблагоприятные для рассеивания, при $0,25 < K' \leq 0,4$ - неблагоприятные, при $0,4 < K' \leq 0,8$ - относительно неблагоприятные, при $0,8 < K' \leq 1,25$ - относительно благоприятные и при $K' > 1,25$ - благоприятные условия.

Повторяемость метеорологических величин, определяющих потенциал самоочищения атмосферы. Для анализа повторяемости скоростей ветра, повторяемости дней с осадками были использованы наблюдения с метеорологических станций за 8 сроков за 1980-2025 гг. Данные взяты с сайта «Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации – Мирового центра данных». Повторяемость инверсий рассчитывалась по формуле

$$P_{ин} = 31,4 + 0,29 * P_{ш} \quad (3.4)$$

где $P_{ин}$ – повторяемость инверсий, $P_{ш}$ – повторяемость скоростей ветра 0–1 м/с.

После обработки данных были составлены таблицы и построены графики повторяемости слабый скоростей ветра, повторяемости инверсий, повторяемости дней с ветром ≥ 6 м/с и осадками $>0,5$ мм. В соответствии с графиками были сделаны следующие выводы:

1) в Казани наблюдается устойчивый рост штилевых явлений. Особенно резкое увеличение с 2001 по 2010 годы (с 19,8% до 39,7%). В последние годы показатель стабилизировался на уровне 36-43%. Для Саратова прослеживаются колебания с тенденцией к росту повторяемости слабых ветров в последние годы (с 13-21% до 18-39%). В Астрахани наблюдается постепенный рост повторяемости скорости ветра 0-1 м/с с 14-24% до 18-34%. Для всех городов характерно снижение скорости ветра и увеличение штилевых явлений.

2) повторяемость инверсий в течение года стабильна во всех городах и на протяжении всех десятилетий рассматриваемого периода.

3) за исследуемый период повторяемость дней с осадками $\geq 0,5$ мм примерно одинакова во всех городах - в зимние месяцы отмечается максимум, в летние месяцы – минимум. В Астрахани в течение всего рассматриваемого периода повторяемость осадков $\geq 0,5$ мм ниже, чем в остальных городах.

4) в Казани повторяемость сильных ветров происходит значительное снижение с 80-х годов (с 15-23% до менее 1% к 2010 году). Незначительное увеличение в последние годы (до 0,2-1%). Для Саратова и Астрахани характерно существенное снижение повторяемости (с 6-18% до 2-9% и с 7-13% до 1-9% соответственно).

Расчет коэффициента самоочищения атмосферы. Также по данным был рассчитан коэффициент самоочищения рассматриваемых городов за период 1980-2025 гг., построены графики. Проанализировав полученные графики, можно проследить чёткую динамику изменения коэффициента самоочищения атмосферы в городах Поволжья. В период с 1980 по 2000 гг. безусловным лидером являлась Казань. Значения коэффициентов самоочищения здесь были существенно выше, чем в Саратове и Астрахани. Это наглядно видно при сопоставлении показателей: так, в 80-90-х годах коэффициент для первого месяца в Казани составлял 1,47, тогда как в Саратове – 1,04, а в Астрахани – лишь 0,57. Аналогичная разница прослеживается и в конце года (для XII месяца: 1,39 против 1,01 у Саратова и 0,52 у Астрахани). Высокие значения, превышающие единицу, свидетельствуют о том, что в тот период метеорологические условия в Казани (включая повторяемость сильных ветров, осадков и отсутствие штилей) были более благоприятными для рассеивания и самоочищения атмосферы.

Однако ситуация кардинально изменилась в период после 2001 года (десятилетие 01-10-х годов). В Казани произошёл резкий спад показателей самоочищения: коэффициенты стремительно снизились, опустившись ниже единицы (например, для I месяца значение упало до 0,54, это же значение

наблюдается и для XII месяца), что указывает на ухудшение климатических условий для рассеивания примесей (преобладание штилей и слабых ветров).

В то же время в Саратове наблюдалась противоположная тенденция: показатели оставались относительно стабильными и устойчивыми. В период 01-10-х годов значения варьировались в диапазоне 0,31-0,58, что оказалось выше, чем у Казани, а в последующие периоды (11-20-е и 21-25-е годы) коэффициент вновь вырос, достигнув отметок 0,70-0,85.

Что касается Астрахани, то её показатели на протяжении всего рассматриваемого периода оставались самыми низкими среди трёх городов. В 80-90-х годах значения колебались в районе 0,57-0,61, а в последующие десятилетия продолжали снижаться или оставаться на невысоком уровне (например, в 01-10-х годах – в диапазоне 0,18-0,48). Это говорит о том, что климатические условия в Астрахани исторически менее благоприятны для самоочищения атмосферы.

Во всех трёх городах прослеживается ярко выраженная сезонность показателей самоочищения атмосферы. Наиболее низкие значения коэффициента наблюдаются в летние месяцы, особенно в июле и августе. Это объясняется естественными процессами: в жаркий период года турбулентность воздушных масс снижается, количество осадков минимально, а интенсивность испарения достигает максимальных значений. Всё это приводит к ухудшению способности атмосферы к самоочищению.

Противоположная ситуация складывается в зимний период, особенно в декабре и январе, а также поздней осенью. В это время года усиливается вертикальное и горизонтальное перемешивание воздушных масс, увеличивается количество осадков, что способствует более эффективному очищению атмосферы от загрязняющих веществ.

Сравнительный анализ городов показывает существенные различия в способности их атмосфер к самоочищению. Лидером является Казань, где среднегодовой показатель коэффициента достигает 0,60. Это свидетельствует о высокой естественной способности атмосферы этого города к очищению от

загрязнений. Второе место занимает Саратов со средним показателем 0,58. Замыкает тройку Астрахань, демонстрирующая самый низкий показатель – 0,35, что указывает на ограниченные возможности природной очистки воздуха в этом регионе.

Амплитуда сезонных колебаний также различается между городами. В Казани и Саратове разница между зимними максимумами и летними минимумами достигает 0,45-0,5 единиц, что говорит о сильной зависимости процесса самоочищения от погодных условий. В Астрахани колебания менее выражены, однако даже в пиковые зимние месяцы показатели остаются относительно низкими – около 0,43, а летом опускаются до критически малых значений 0,17-0,21.

Особую озабоченность вызывает ситуация в Астрахани, где низкие показатели коэффициента самоочищения создают повышенный экологический риск. При таких значениях загрязняющие вещества задерживаются в атмосфере значительно дольше, что может приводить к накоплению вредных примесей и ухудшению качества воздуха, особенно в летний период.

Заключение. Сравнительный анализ коэффициента самоочищения атмосферы, рассчитанный для городов: Казань, Саратов, Астрахань за период 1980-2025 гг., показал, что в рассматриваемых городах имеются ограниченные возможности к самоочищению. Сложные физико-географические условия и микроклиматические особенности формируют различный потенциал самоочищения. В Казани и Саратове климатические условия относительно неблагоприятные для рассеивания вредных примесей в атмосфере, в Астрахани – неблагоприятные. Относительно высокие параметры самоочищения атмосферы во всех рассматриваемых городах наблюдаются в холодный период года. Кроме физико-географических особенностей и условий застройки города, метеорологические условия, формирующие уровень загрязнения воздушной среды города, в большей степени зависят от синоптической ситуации, наблюдаемой на территории города.