

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

Кафедра метеорологии и климатологии

**Пространственная и временная изменчивость атмосферного аэрозоля  
в Саратове по данным спутниковых наблюдений**

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

студентки 4 курса 411 группы

направления (специальности) 05.03.05 Прикладная гидрометеорология  
код и наименование направления (специальности)

географического факультета

наименование факультета, института, колледжа

Семиковой Виктории Алексеевны

фамилия, имя, отчество

Научный руководитель

доцент, к.г.н., доцент

должность, уч. степень, уч. звание

подпись, дата

М. Ю. Червяков

инициалы, фамилия

И. о. Зав. кафедрой

к.г.н., доцент

должность, уч. степень, уч. звание

подпись, дата

М. Ю. Червяков

инициалы, фамилия

Саратов 2026

**Введение.** Изменения климата и загрязнения окружающей среды являются одними из самых важных экологических проблем, при этом атмосферные аэрозоли (пыль, вулканический пепел, промышленные выбросы и т.д.) играют важную роль в климатических процессах и ухудшают качество воздуха. В конце XX века стало ясно, что исследования оптических явлений и облачных процессов невозможно без понимания физической картины образования и трансформации аэрозолей, поэтому сейчас изучение атмосферного аэрозоля является одним из самых актуальных направлений в области метеорологии.

Целью данной бакалаврской работы является выявление и анализ пространственной и временной изменчивости концентрации атмосферного аэрозоля в районе г. Саратова на основе данных спутниковых наблюдений. Для достижения данной цели были поставлены задачи: провести обзор научной литературы, сформировать массив эмпирических данных, установить связи между параметрами ветра, направлением переноса воздушных масс и параметрами аэрозоля, а также определить потенциальные источники аэрозольного загрязнения, сформулировать основные выводы о сезонной, межгодовой и высотной изменчивости аэрозоля в Саратове.

В бакалаврской работе использованы данные спутниковых наблюдений и численного моделирования за период 2021–2025 гг., охватывающие ключевые параметры аэрозоля (оптическая толщина атмосферы (AOT) и концентрации аэрозолей  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$ ,  $PM_{10}$ ) и ветра для точки с координатами  $51,59^{\circ}$  N,  $45,97^{\circ}$  E (г. Саратов). Применение методов кластеризации, обратного траекторного анализа (HYSPLIT) и взвешенных траекторий (CWT) позволило выявить устойчивые аэрозольные режимы и локализовать источники загрязнения, что даёт возможность прогнозировать эпизоды повышенного риска для здоровья населения в зависимости от сезона и синоптической ситуации.

Структура бакалаврской работы включает в себя введение, 2 основные главы, заключение и список использованных источников. В первой главе «Аэрозольные частицы в атмосфере» рассмотрены теоретические основы исследования. Вторая глава «Изменчивость оптической толщины атмосферы над

Саратовом» посвящена практическому исследованию: описаны исходный материал и методика его обработки, представлены результаты анализа пространственной и временной изменчивости аэрозоля.

**Основное содержание работы.** Исследование изменчивости атмосферного аэрозоля в Саратове на начальном этапе базировалось на статистическом анализе многолетнего массива данных (2021-2025 гг.). Расчет статистических характеристик параметров аэрозоля позволил установить, что в подавляющем большинстве случаев в регионе регистрируются стабильные фоновые условия с умеренной аэрозольной нагрузкой. Так, среднее значение АОТ за весь исследуемый период составило 0,065.

Однако анализ временных рядов и помесечного распределения величин выявил высокую изменчивость и нестабильность параметров аэрозоля в течение года. На общем фоновом уровне регулярно фиксируются кратковременные эпизоды экстремального увеличения как приземных концентраций пыли, так и радиационного помутнения всей толщи атмосферы, когда пиковые значения параметров в несколько раз превышают фоновые значения.

Поскольку стандартный одномерный статистический и парный корреляционный анализ отражают лишь усредненную картину и не позволяют выявить скрытые нелинейные связи между разнородными параметрами во время таких аномалий, возникла необходимость их многомерной классификации. Для автоматического поиска и выделения устойчивых комбинаций признаков, закономерно сменяющих друг друга, был применен метод кластеризации k-means. Итоговое признаковое пространство для кластеризации было сформировано из 3 независимых предикторов: масштабированная величина АОТ, главная компонента РМ (интегральный показатель запыленности, полученный в результате применения метода РСА) и показатель  $PM_{ratio}$ , определяющийся как отношение концентрации  $PM_{2.5}$  к концентрации  $PM_{10}$  и характеризующий преобладание мелко- или крупнодисперсной фракции в структуре аэрозоля.

В результате кластеризации массива данных были выделены 5 качественно различающихся аэрозольных режимов. Средние значения, характерные для каждого аэрозольного режима приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Средние значения параметров аэрозоля, характерные для различных атмосферных режимов (составлено автором)

Режим	1	2	3	4	5	Средние значения
Количество случаев	12213	11214	9109	6067	5203	43806
АОТ	0,016	0,042	0,081	0,211	0,033	0,065
PM <sub>1</sub>	2,88	9,10	3,29	8,88	10,70	6,32
PM <sub>2,5</sub>	3,54	11,42	4,05	13,72	12,08	8,09
PM <sub>10</sub>	4,97	16,91	6,13	30,22	12,81	12,69
PM <sub>ratio</sub>	0,745	0,678	0,659	0,514	0,947	0,702

Первый режим (28% случаев) соответствует чистой атмосфере с преобладанием мелкодисперсных частиц. Этот режим описывает эталонную, предельно чистую воздушную среду при интенсивном притоке отдаленных, незагрязненных воздушных масс и сильном турбулентном перемешивании воздуха в городе. Второй режим (26% случаев) – чистая атмосфера с преобладанием крупных частиц. Данный режим описывает стандартную повседневную экологическую обстановку в Саратов наиболее типичную для города. Третий режим (21% случаев) – перенос аэрозоля на высоте. Характерен для наличия в атмосфере высотных шлейфов (например, от лесных пожаров или пыльных бурь), не затрагивающих приземный слой. Четвертый режим (14% случаев) связан с пылевым переносом и высоким загрязнением, которое происходит при ветровом подъеме минеральной пыли, например, при переносе воздуха из пустынь Центральной Азии. Пятый режим (11% случаев) – накопление аэрозоля у земли. Характерен для дней с неблагоприятными

метеорологическими условиями (НМУ): температурные инверсии, низкие скорости ветра и отсутствие осадков.

Чтобы понять, откуда именно переносился замутненный воздух, были проанализированы обратные траектории движения воздушных масс. Для решения этой задачи были использованы результаты моделирования обратных траекторий модели HYSPLIT.

Кластерный анализ позволил выделить 5 основных траекторий переноса воздушных масс (рисунки 1-3).

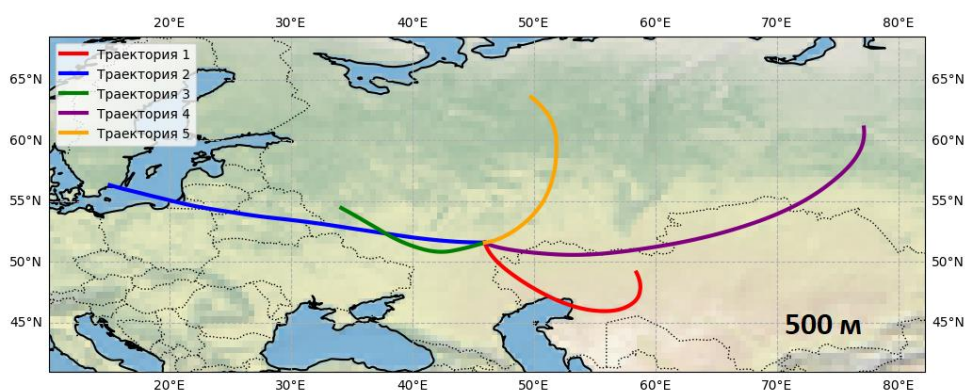


Рисунок 1 – Типовые 4-дневные траектории переноса частиц на высоте 500 м (составлено автором)

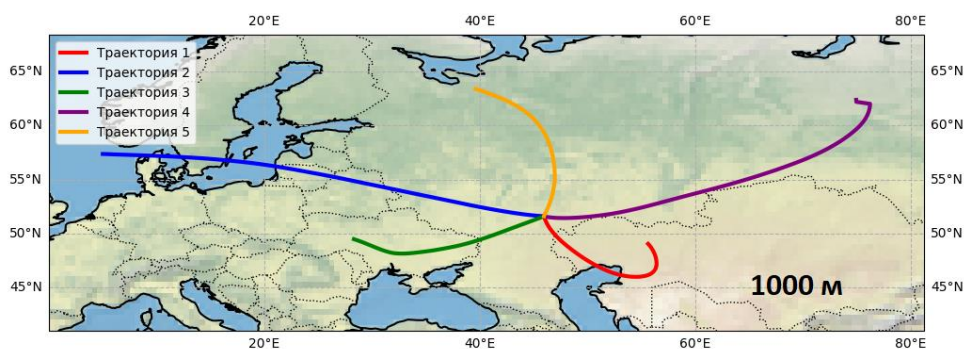


Рисунок 2 – Типовые 4-дневные траектории переноса частиц на высоте 1000 м (составлено автором)

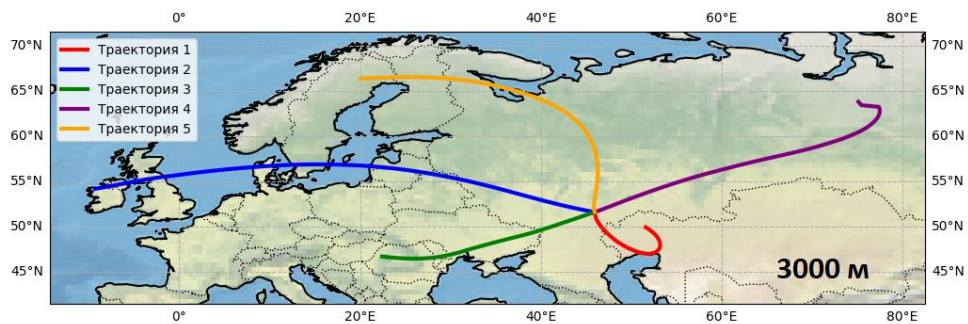


Рисунок 3 – Типовые 4-дневные траектории переноса частиц на высоте 3000 м  
(составлено автором)

Первая траектория имеет дугообразную форму и описывает юго-восточный перенос из Казахстана и Прикаспийской низменности, укорачивающийся с высотой из-за ослабления ветра. Маршрут служит основным источником крупнодисперсной пыли в пограничном слое, формируя пылевой режим с повторяемостью от 45% на 500 м до 34% на 3000 м. На уровне 3000 м пылевая нагрузка снижается, уступая место режиму высотного переноса аэрозоля с частотой 28%.

Вторая траектория отражает западный перенос, поставляющий чистый атлантико-европейский воздух, географический охват которого расширяется с высотой до Северной Атлантики. В нижних слоях (500–1000 м) этот поток полностью очищает город от грубой пыли, обеспечивая доминирование режима чистой атмосферы с мелкими частицами (39–42%). На высоте 3000 м воздушные массы сохраняют высокую прозрачность, но успевают вобрать в себя умеренное количество крупной фракции (30%).

Третья траектория описывает европейский перенос, который с высотой удлиняется и смещается от короткого северо-западного потока к мощному западному течению из района Карпат. В приземном слое (500 м) этот замедленный перенос провоцирует застой воздуха и достижение максимума для режима накопления аэрозоля у земли. В свободной тропосфере (3000 м) данный сектор полностью перестраивается и обеспечивает стандартный чистый фон с преобладанием крупных частиц (34%).

Четвертая траектория представляет собой вертикально однородный Восточно-Сибирский перенос, проходящий по протяженной дуге через Южную Сибирь и Северный Казахстан на всех исследуемых высотах. В приземном слое этот поток формирует сухой чистый воздух или умеренный аэрозольный фон с равномерным распределением режимов (по 25–28%). На высотах 1–3 км траектория начинает транспортировать шлейфы замутнения, где на уровне 3000 м преобладает чистая атмосфера с мелкими частицами (35%) при значительном вкладе высотного переноса (24%).

Пятая траектория описывает северный меридиональный перенос, который с высотой существенно удлиняется и смещается от Предуралья (500 м) и Архангельской области (1000 м) к северу Скандинавского полуострова (3000 м). На всех исследуемых уровнях этот арктический поток выступает эталоном экологической чистоты, полностью блокируя приземные пылевые бури (всего 2–4%). Ведущую роль здесь играют режим чистой атмосферы с крупными частицами (30–37%) и режим высотного переноса аэрозоля (26–28%).

Для локализации источников аэрозольного загрязнения помимо кластеризации обратных траекторий применён метод взвешенных траекторий (CWT), позволяющий перейти от общих направлений переноса к точечному картированию очагов эмиссии (рисунки 4-6).

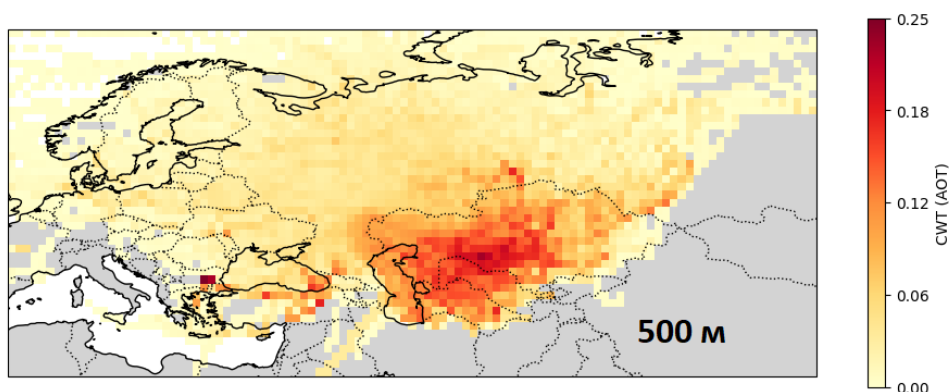


Рисунок 4 – Поле потенциальных источников аэрозольного загрязнения атмосферы (результат применения метода взвешенных траекторий CWT для АОТ на высоте 500 м) (составлено автором)

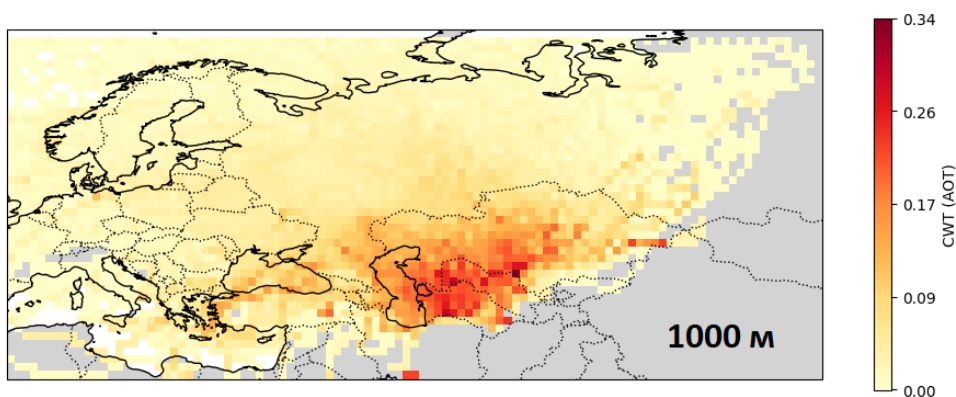


Рисунок 5 – Поле потенциальных источников аэрозольного загрязнения атмосферы (результат применения метода взвешенных траекторий CWT для АОТ на высоте 1000 м) (составлено автором)

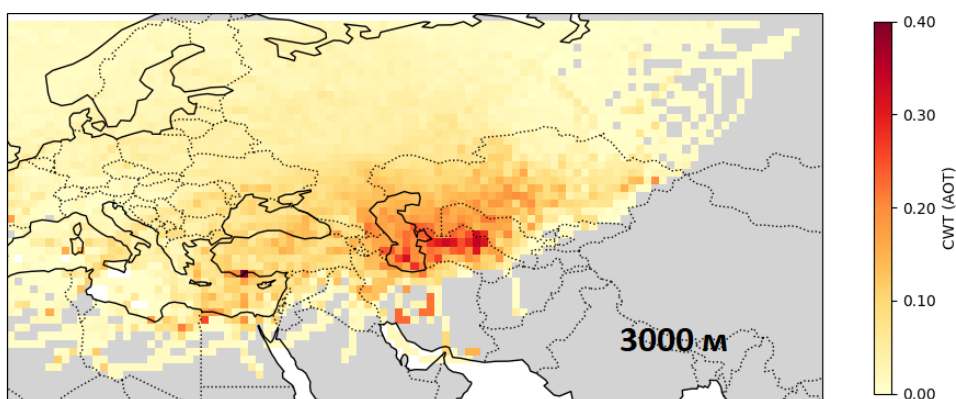


Рисунок 6 – Поле потенциальных источников аэрозольного загрязнения атмосферы (результат применения метода взвешенных траекторий CWT для АОТ на высоте 3000 м) (составлено автором)

Результаты CWT выявили ключевые регионы-источники аэрозоля для Саратова: на высоте 500 м основной вклад дают аридные территории Центральной Азии и Прикаспия (пустыни Кызылкум, Каракумы, Приаралье, полуостров Мангышлак) – они формируют устойчивый «аэрозольный коридор» через Прикаспийскую низменность и Нижнее Поволжье. С ростом высоты (1000-3000 м) усиливается роль высотного трансграничного переноса: на 1000 м доминируют пылевые выносы из Центральной Азии и мелкодисперсный аэрозоль из Сибири и Северного Казахстана, на 3000 м – долгоживущий аэрозоль с Ближнего Востока, из Турции и восточной части Средиземноморья. При этом

северо-западные и северные регионы Европы и Европейской территории России остаются источниками относительно чистого воздуха.

Сравнительный анализ полей С<sub>WT</sub> для концентрации РМ<sub>10</sub> и АОТ позволил выявить различия в высотной структуре аэрозольного загрязнения.

Для РМ<sub>10</sub> характерен низковысотный характер переноса: основной вклад в концентрацию крупных частиц дают пустынные территории Центральной Азии (Кызылкум, Каракумы, Приаралье) – они формируют устойчивый «пылевой коридор» через Прикаспийскую низменность и Нижнее Поволжье. С ростом высоты (до 3000 м) вклад этого очага существенно снижается из-за гравитационного осаждения крупных частиц — поле запыления сжимается до узкой полосы на юге Казахстана и Узбекистана.

В то же время АОТ отражает интегральное замутнение атмосферного столба: на высоте 3000 м ключевую роль играют высотные широтные коридоры — Сибирский (перенос мелкодисперсных дымов от лесных пожаров) и Ближневосточный (долгоживущий трансграничный аэрозоль). Эти потоки существенно влияют на ослабление солнечной радиации, но практически не увеличивают приземную концентрацию РМ<sub>10</sub>.

Анализ временных рядов выявил сезонную динамику параметров аэрозоля (рисунок 7). На графиках средних месячных значений АОТ и концентрации аэрозоля РМ<sub>1</sub>-РМ<sub>10</sub> наблюдается устойчивое увеличение показателей в весенне-летний период. Сезонный пик АОТ и концентрации РМ<sub>1</sub> и РМ<sub>10</sub> приходится на апрель, а максимум РМ<sub>2,5</sub> отмечается на месяц раньше – в марте. После майского снижения значений наблюдается вторичный рост показателей в июне, с последующим постепенным уменьшением до ноября, когда начинается новый цикл возрастания параметров. Следует подчеркнуть, что максимальные абсолютные значения как АОТ, так и концентраций аэрозоля РМ<sub>1</sub>-РМ<sub>10</sub>, аналогично сезонным пикам, приходятся на март-апрель, что согласуется с выявленной сезонной динамикой.

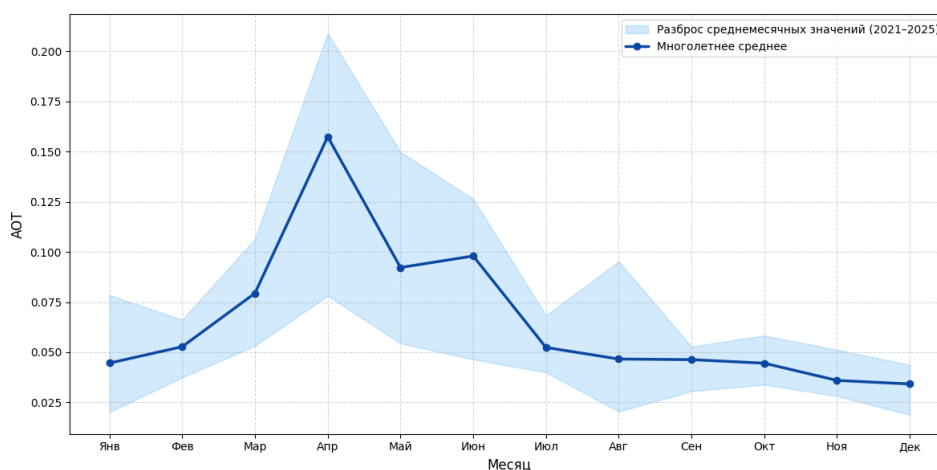


Рисунок 7 – График сезонного хода среднемесячных значений АОТ в период 2021-2025 гг. (составлено автором)

В Саратове выявлена чёткая сезонная цикличность аэрозольных режимов и соответствующих им траекторий переноса воздушных масс.

Зимой (преобладание чистой атмосферы с мелкими частицами – 48%) чистота воздуха обусловлена поступлением воздушных масс из Арктики (35%) и Причерноморья (32%) на фоне снежного покрова и минимального вклада сибирских потоков (8%). Весной возрастает запылённость (суммарно 53% дней – режимы с крупной фракцией) из-за механического пыления при сходе снега и влияния 10% траекторий из Центральной Азии и 15% из Сибири при общей вентиляции северными потоками (38 %). Летом структура смещается к фоновому запылению и накоплению мелкодисперсного аэрозоля (в т. ч. из-за шлейфов гари): растёт доля сибирских траекторий (20%), обеспечивающих высотный перенос, а вклад Центральной Азии снижается до 7%. Осенью преобладает широтный перенос из Причерноморья (31%) и Европы, формирующий устойчивый антропогенный фон; пылевой перенос минимален (7%).

Таким образом, сезонная динамика аэрозольного состояния атмосферы Саратова тесно связана с изменчивостью преобладающих направлений адвекции и сопутствующими метеорологическими условиями.

**Заключение.** Таким образом, в ходе исследования проведён комплексный анализ динамики атмосферного аэрозоля над Саратовом: выполнен статистический и корреляционный анализ, с помощью кластеризации выделены 5 устойчивых аэрозольных режимов и 5 типовых сценариев переноса воздушных масс (на высотах 500, 1000 и 3000 м), методом SWT локализованы источники загрязнения.

Установлено, что аэрозольная обстановка в регионе отличается нестабильностью и выраженной сезонной цикличностью: максимум загрязнения приходится на весенне-летний период, зимой атмосфера наиболее чистая. Корреляционный анализ подтвердил тесную связь оптических свойств атмосферы с содержанием грубодисперсного аэрозоля ( $PM_{10}$ ).

Ключевыми источниками крупнодисперсной пыли ( $PM_{10}$ ) выступают пустыни Центральной Азии (Кызылкум, Каракумы, Приаралье) – их влияние наиболее заметно на высотах 500-1000 м. АОТ на больших высотах формируется за счёт высотных потоков – мелкодисперсных аэрозолей от сибирских лесных пожаров и трансграничного переноса пыли с Ближнего Востока и Средиземноморья. При этом приземное загрязнение имеет преимущественно региональный характер, а оптическое замутнение всей толщи атмосферы – глобальный.

Выявленные закономерности отражают связь состояния воздушного бассейна Саратова с сезонной перестройкой циркуляции атмосферы и состоянием подстилающей поверхности. Результаты работы могут быть использованы для совершенствования систем мониторинга качества воздуха и планирования превентивных мер в периоды повышенного риска загрязнения.