

УДК 628.511:728.2.05

**В. Ю. Черепанов, В. В. Лупиногин, Т. К. Акчурин, О. В. Душко,
В. Г. Поляков, А. П. Поздняков**

Волгоградский государственный технический университет

ЭФФЕКТИВНЫЕ ПОДХОДЫ ПО ЗАЩИТЕ ОБЪЕКТОВ КУЛЬТУРНОГО НАСЛЕДИЯ ОТ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ФАКТОРОВ АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА

Рост промышленного производства и активная урбанизация приводят к увеличению количества загрязняющих веществ, поступающих в атмосферный воздух. Твердые частицы (пыль) способны оказывать прямое или косвенное воздействие на состояние объектов культурного наследия. При прямом воздействии происходит механическое истирание поверхности, коррозионные процессы, обусловленные образованием кислот из солей. Косвенное воздействие характеризуется изменением климатических условий, которое определяется тремя видами взаимодействия (аэрозоль-излучение): рассеяние, поглощение входящего и исходящего излучения.

Ключевые слова: объект культурного наследия, атмосферный воздух, пылевые частицы, адгезия, PM_{10} , $PM_{2,5}$, соли, кислоты, осаждение частиц, режимы распределения частиц.

Введение

Загрязнение атмосферного воздуха твердыми частицами в последние годы становится одной из серьезных угроз, которая влияет на социальное и экологическое благополучие населения. Воздействие пыли на организм человека определяется ее диаметром, концентрацией, химическим составом и продолжительностью воздействия.

Всемирной организацией здравоохранения установлены нормативы среднегодовой концентрации твердых частиц $PM_{2,5}$ — 10 мкг/м^3 , PM_{10} — 20 мкг/м^3 , для среднесуточной концентрации $PM_{2,5}$ — 25 мкг/м^3 , PM_{10} — 50 мкг/м^3 . В зависимости от диаметра частицы могут оседать в носоглоточной, трахеобронхиальной, альвеолярной областях (при отсутствии носового дыхания). Так, частицы диаметром от 2,5 до 10 мкм оседают в носоглоточной области, в то время как частицы диаметром не более 2,5 мкм попадают в альвеолярную область и вызывают пневмокониоз, воспаление легких [1].

Воздействие твердых частиц на фасады зданий — объектов культурного наследия определяется рядом факторов, среди которых стоит выделить следующие: наличие пылезащитных зеленых насаждений, источник выброса (передвижной, стационарный), вид твердых частиц (первичные, вторичные), форма застройки и здания, климатические параметры (скорость, направление ветра, температура, относительная влажность, количество осадков), характеристики твердых частиц (химический состав, размер, гигроскопичность, растворимость) [2—4].

Твердые частицы, поступающие в атмосферный воздух, как правило, являются вторичными, т. е. образованными в результате гетерогенного зародышеобразования. Дисбаланс в сторону определенных источников загрязнения атмосферного воздуха определяется промышленной ориентированностью, развитием транспортной инфраструктуры и метеорологическими параметрами на

рассматриваемой территории. Характер воздействия образованных частиц определяется комбинацией исходных реагентов и их концентрацией.

Следовательно, можно выделить следующие факторы, оказывающие влияние на качество атмосферного воздуха, а в дальнейшем — и на здания, являющиеся объектами культурного наследия (рис. 1).

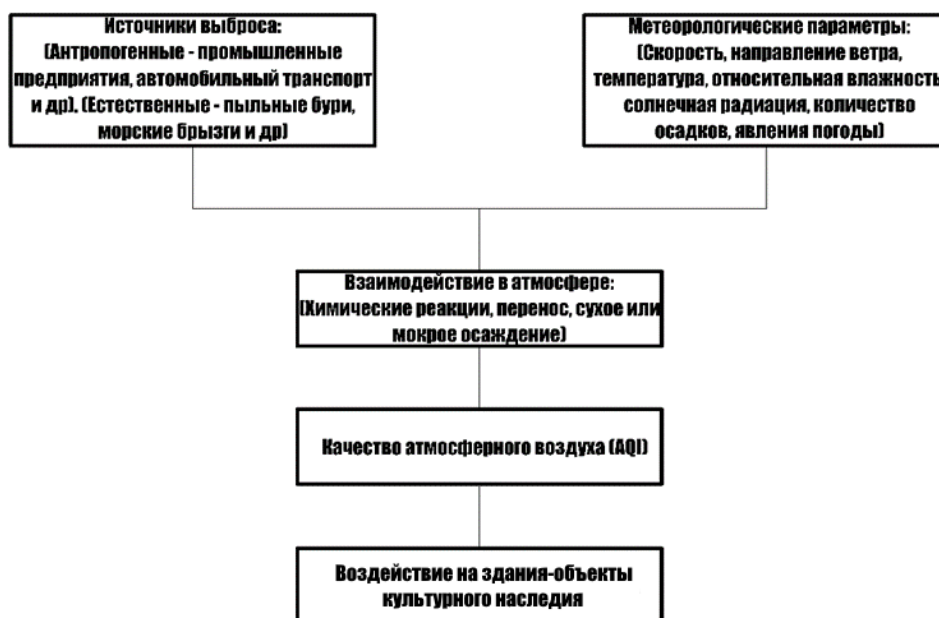


Рис. 1. Параметры, оказывающие влияние на состояние атмосферного воздуха [5]

Целью данной работы является исследование влияния загрязнения атмосферного воздуха на состояние фасадов зданий — объектов культурного наследия.

Основная часть

Режимы распределения частиц в атмосферном воздухе от различных источников

Аэрозоль, образованный в результате загрязнения атмосферного воздуха твердыми частицами, можно классифицировать исходя из его граничного диаметра. В работе автора [6] выделены следующие режимы распределения частиц: нуклеации, Эйткена, накопления, грубый. На рис. 2 представлена упрощенная схема распределения твердых частиц (по количеству и массе) в атмосферном воздухе.

На основании данных [5] о состоянии атмосферного воздуха в Волгоградской области можно выделить следующие источники загрязнения атмосферного воздуха на территории Волгограда.

Предприятия тяжелой промышленности: АО «Корпорация Красный Октябрь» (изготовление прокатной нержавеющей стали, Краснооктябрьский район); АО «ФНПЦ «Титан-Баррикады» (производство металлических конструкций, Краснооктябрьский район); АО «Каустик» (производство неорганических химических веществ, Красноармейский район); ОАО «Волгограднефтемаш» (производство нефтегазового оборудования, Советский район);

АО «РУСАЛ Урал», филиал «РУСАЛ Волгоград» (производство алюминия из глинозема, Тракторозаводский район); ООО «Радуга Цинк Лист» (нанесение полимерного покрытия на прокат оцинкованной стали, Красноармейский район) [5].

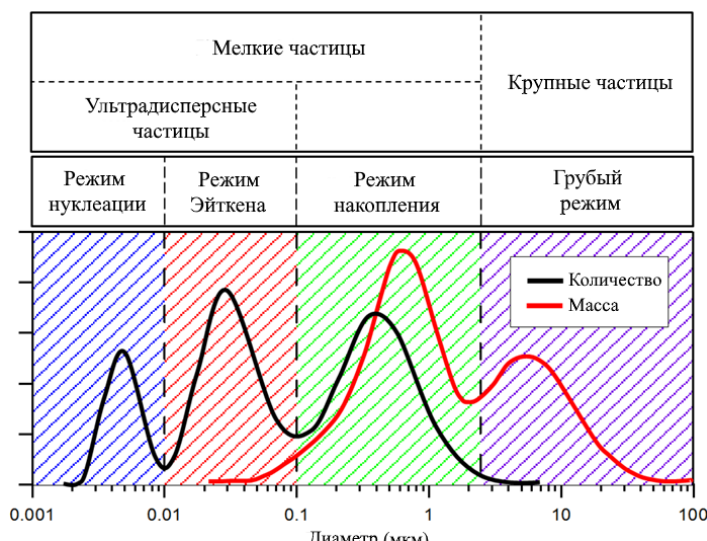


Рис. 2. Упрощенная схема распределения частиц по количеству и массе в атмосферном воздухе [6]

Предприятия легкой промышленности: ООО «ПО „Шеврет“» (производство изделий из кожи, Советский район), ООО «ВИТ» (производство лакокрасочных изделий, Городищенский район), ООО «Корпорация «ВОЛМА» — «Крона Рецилинг» (утилизация и переработка бумажных отходов, Тракторозаводский район), «Вторматик» (пункты приема вторсырья).

Строительные работы (за последние 10 лет): возведение жилищных комплексов (Ворошиловский район — ЖК «Династия», ЖК «Маяковский», проект «Урбан», ЖК «Гала Парк», ЖК «Бух», ЖК «Фаренгейт», ЖК «Академический» и др.), (Центральный район — ЖК «Машков», ЖК «Репников», ЖК «Цех», ЖК «Арбат», ЖК «5 Вершин» и др.).

Транспортные средства: по данным Росприроднадзора [5], в значительной степени преобладают выбросы от автомобильного транспорта (76,8 тыс. т) в отличие от железнодорожного (2,7 тыс. т).

По данным Росприроднадзора [5], в структуре источников выбросов преобладают стационарные, среди которых в определенном соотношении выделяются следующие виды деятельности (рис. 3).

На основании данных [5] можно определить, что наибольший вклад в загрязнение атмосферного воздуха вносят стационарные источники, в то время как вклад передвижных источников (автомобильный, железнодорожный транспорт) минимален и локализован в пределах трех крупных автомагистралей (1-, 2- и 3-я Продольные магистрали). Среди стационарных источников лидирующие позиции по количеству выбросов занимают следующие виды деятельности: сбор, обработка и утилизация отходов (46,56 %), производство алюминия (29,92 %) и нефтепродуктов (23,52 %).

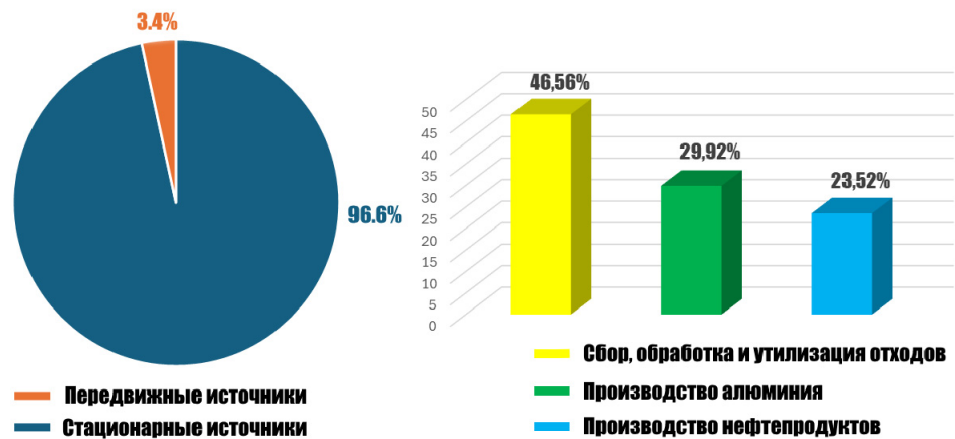


Рис. 3. Соотношение количества выбросов (ЗВ) от стационарных и передвижных источников, состав выбросов стационарных источников, характерных для Волгоградской области

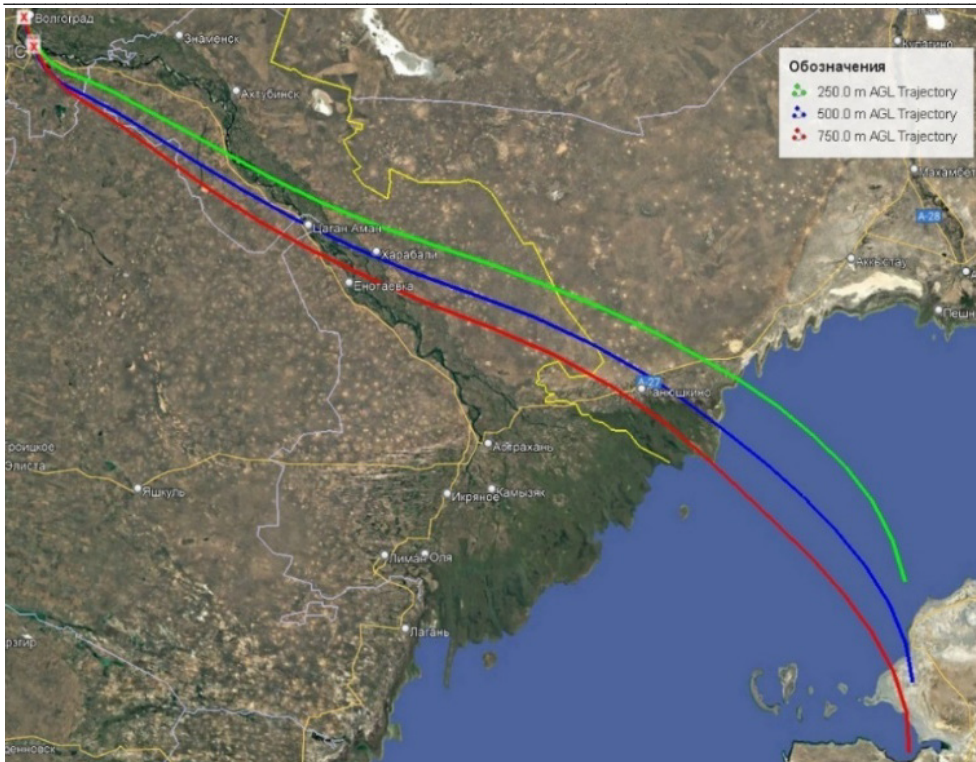
Существенный вклад в загрязнение атмосферного воздуха, ввиду географического положения Волгограда, оказывают естественные источники (степной аэрозоль, морской аэрозоль) [7] (рис. 4).

Количество выбросов твердых частиц естественного происхождения определяется поверхностной нагрузкой, состоянием поверхности и метеорологическими параметрами (относительная влажность, скорость ветра), пылеобразующей способностью частиц. При этом на количество выбрасываемых частиц $PM_{2,5}$ и PM_{10} в большей степени влияет детальное распределение частиц, чем их геометрический диаметр [8—12]. На рис. 5 представлено распределение размеров твердых частиц в зависимости от источника выброса.

На основании данных из работ [8—12] достаточно хорошо видно, что преобладающая доля частиц, поступающих от источников выброса в атмосферный воздух, имеет диаметр, не превышающий 10 мкм (за исключением производства алюминия, пыльных бурь, строительных работ). При этом на основании представленного количественного распределения частиц по размерам можно утверждать, что массовая доля для частиц диаметром более 10 мкм будет минимальна, за исключением некоторых источников.

Стоит учитывать, что время нахождения твердых частиц во взвешенном состоянии определяется диаметром, плотностью, формой частиц, метеорологическими параметрами (скорость ветра, относительная влажность). В свою очередь, диаметр частиц вкупе с метеорологическими параметрами определяет радиус зоны рассеивания, характеризующим показателем которой является скоростью оседания. Так как скорость оседания частиц малого диаметра минимальна, а радиус их зоны рассеивания значительно больше, чем для частиц диаметром более 10 мкм, можно утверждать, что воздействие таких частиц локализовано [13].

Поэтому с точки зрения оценки воздействия твердых частиц на фасады зданий — объектов культурного наследия стоит рассматривать частицы $PM_{2,5}$ и PM_{10} , режим накопления грубый.



a



b

Рис. 4. Обратные траектории движения воздушных масс для Волгоград (HYSPLIT):
a — морской аэрозоль; *b* — степной аэрозоль

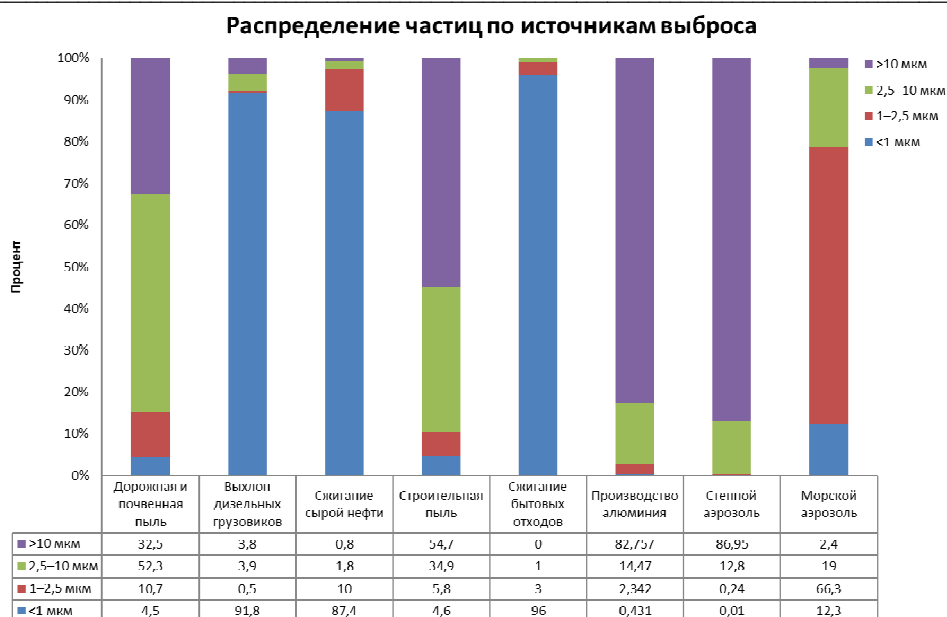


Рис. 5. Распределение частиц по диаметрам для различных источников выброса [8—12]

Воздействие пылевых отложений на фасады зданий — объектов культурного наследия

Фасад является элементом ограждающей конструкции здания, который служит барьером между внешней и внутренней средой здания. Он обеспечивает защиту внутренней среды здания и его устойчивость к атмосферным явлениям, акустическому, термическому воздействию внешней среды. Для улучшения визуального вида фасадов зданий и их защиты от воздействия факторов внешней среды используют облицовочные материалы [14].

Как правило, здания — объекты культурного наследия в Волгограде выполнены из глиняного или силикатного кирпича, который покрыт облицовочными материалами. В качестве облицовочных материалов используются фасадная краска, штукатурка, силикатная плитка и т. д.

На здание — объект культурного наследия оказываются следующие виды воздействия, обусловленные косвенным и прямым влиянием твердых частиц (рис. 6).

Воздействие пылевых частиц на фасады зданий — объектов культурного наследия может осуществляться путем изменения климатических параметров (косвенное) и коррозионных, механических процессов (прямое). При косвенном воздействии происходит изменение метеорологических параметров, обусловленное рассеянием, поглощением входящего или исходящего излучения твердыми частицами. При прямом воздействии пылевых частиц на фасады зданий происходит механическое истирание поверхности оседания, коррозионное выветривание материала фасада вследствие гидролиза солей. Стоит выделить следующие виды влияний при косвенном и прямом воздействии пылевых частиц на фасады зданий — объектов культурного наследия (табл.).

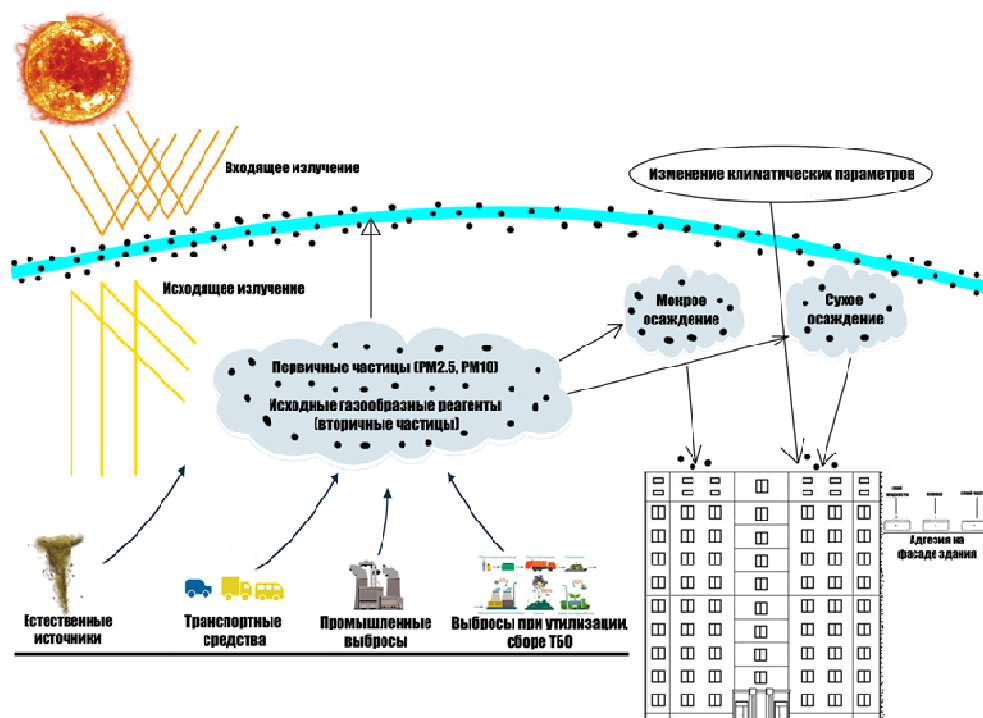


Рис. 6. Влияние пылевых частиц на фасад здания — объекта культурного наследия

*Виды воздействия пылевых частиц
 на фасады зданий — объектов культурного наследия*

Характеристика воздействия	Последствия воздействия	Ссылка
Подавление слабых (< 25 мм/сут) и увеличение сильных (> 25 мм/сут) осадков	Растворение элементов искусственного камня	[15]
Поглощение солнечного излучения частицами, содержащими в составе SO_4^{2-}	Возникновение более суровых погодных условий (сильные порывы ветра), выветривание и механическое истирание	[16]
Снижение температуры ввиду наличия поглощающих излучение твердых частиц углерода (С) в атмосферном воздухе, увеличение относительной влажности	Повышенная относительная влажность способствует развитию грибов и микроорганизмов, приводящих к деградации материалов	[17]
Повышение температуры и увеличение количества осадков	Усиление коррозионных процессов карбонатного камня	[18]
Увеличение ветровой нагрузки ввиду загрязнения атмосферного воздуха твердыми частицами	Усиление эрозионной нагрузки вследствие осаждения фторидов и хлоридов	[19]
Рассеяние солнечного излучения твердыми частицами	Изменение цвета фасада здания, вызванное биоповреждением	[19]
Возникновение сильных порывов ветра	Перенос дыма и пыли от транспортных средств на здание	[19]

О к о н ч а н и е т а б л.

Характеристика воздействия	Последствия воздействия	Ссылка
Резкое изменение температуры	Возникновение эрозионных процессов вследствие расширения и сжатия материала	[19]
Гидролиз солей вторичных частиц, содержащих CO ₂ , NO _x , SO _x	Растворение карбонатного камня, образование черных корок	[20, 21]
Солевое выветривание, смещение фазы относительной влажности	Увеличение циклов растворения/кристаллизации, деградация материала	[22]
Осаждение твердых частиц на поверхности	Образование черных корок, гидролиз солей	[23]
Воздействие твердых частиц, содержащих NaCl	Минимальное время растворения искусственного камня, ослабление межзерновых связей	[24]
Воздействие твердых частиц, содержащие аммиак (NH ³⁺)	Коррозионное действие ввиду развития аммиакоокисляющих архей. Потеря гидрофобности материала	[25]
Накопление твердых частиц на поверхности фасадов зданий	Увеличение гигроскопичности материала	[3]

Воздействие пылевых частиц на фасады зданий — объектов культурного наследия может осуществляться по двум направлениям: потеря визуальной составляющей объекта (изменение цвета объекта) и собственно коррозионный процесс составных материалов. Изучением влияния загрязнения фасадов зданий твердыми частицами с точки зрения влияния на визуальное восприятие человека занимается отдельная дисциплина — визуальная экология. При этом коррозионное воздействие пылевых частиц на составные материалы объекта определяется химическим составом. Поэтому для оценки влияния твердых частиц на фасад здания — объекта культурного наследия необходимо знать их химический состав.

Характеристики пылевых частиц и их воздействие на фасады зданий

Для определения дисперсного состава частиц, характерных для жилой зоны, зоны инженерной и транспортной инфраструктуры, использовался анализатор частиц Microtrac S3500. Измерение анализатора Microtrac S3500 основано на принципе лазерной дифракции, в качестве источника света используются три белых лазера, рассеянный свет которых фиксируется фотодетектором. На основании полученных данных в программном обеспечении FLEX можно построить распределение частиц по объему, площади, количеству в интегральной и дифференциальной форме [26] (рис. 7).

Приведенные графики дисперсного анализа показывают, что дисперсный состав для представленных зон почти сходен. Наличие большей объемной доли мелкодисперсных частиц для зоны (инженерной и транспортной инфраструктуры) объясняется распределением частиц в выхлопных газах (см. рис. 5).

Элементный состав пылевых частиц в изучаемых зонах получен с помощью сканирующей электронной микроскопии и представлен на рис. 8.

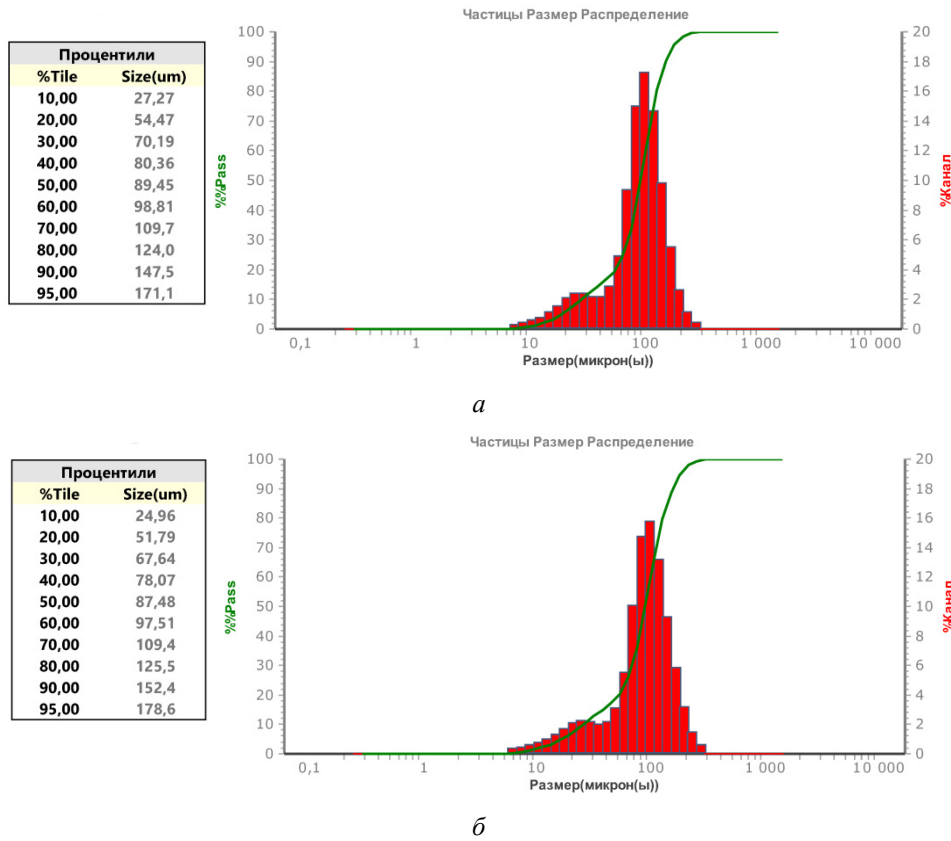


Рис. 7. Распределение частиц по диаметрам в интегральной и дифференциальной форме (объемное): *а* — жилая зона; *б* — зона инженерной и транспортной инфраструктуры

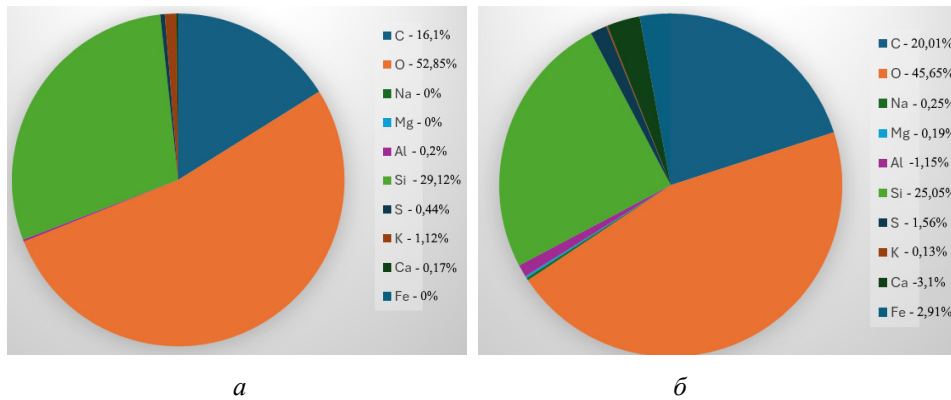


Рис. 8. Элементный состав пылевой навески, отобранной из:
а — жилой зоны; *б* — зоны инженерной и транспортной инфраструктуры

Представленный элементный состав показывает, что в рассматриваемых зонах он примерно одинаков, за исключением большей весовой доли металлических элементов. При этом такое различие объясняется воздействием автомобильного транспорта на атмосферный воздух (выхлопные и невыхлопные частицы) [27, 28].

Стоит выделить следующие виды воздействия химических элементов и соединений на здания — объекты культурного наследия. Так, воздействие углекислого газа (CO_2) на силикатный кирпич характеризуется его карбонизацией, которая приводит к увеличению коэффициента размягчения и его повышенной усадке, потере прочности конструкции. Кроме того, углеродные частицы выполняют каталитическую роль в процессе образования серной и азотной кислот, влияют на цвет фасада [29, 30].

Диоксид серы (SO_2) считается наиболее разрушающим атмосферным агентом, который обладает высокой коррозионной способностью к металлу, способен разрушать поверхностный слой искусственного камня. При взаимодействии с водой превращается в сульфат, в представленном случае коррозионная способность увеличивается в разы, особенно сильно в этом случае страдает карбонатный камень. Образование гипсовых корок на поверхности карбонатного камня приводит к загрязнению фасада здания, страдает его визуальная составляющая [30, 31].

Металлические элементы, содержащиеся в выхлопных газах, переносятся на поверхность фасадов зданий углеродистыми частицами, образуют черную корку. Как правило, образование корок усиливается при высокой относительной влажности [32].

Диоксид кремния (SiO_2) не оказывает прямого коррозионного воздействия на элементы фасада, а, наоборот, используется для повышения коррозионной устойчивости материала. При этом он обладает высокой абразивной способностью, что характеризует его механическое воздействие на фасад здания, особенно при сильных порывах ветра [33].

Хлорид натрия (NaCl) является одной из менее эрозионно эффективных солей с точки зрения ее воздействия на искусственный камень [34]. При этом в работе [24] уже другими авторами подчеркивается, что воздействие представленной соли с точки зрения коррозионного влияния можно считать значительным ввиду частой смены циклов оттаивания/замораживания, которая приводит к разрушению материала.

Цементный бетон обладает большой поверхностной активностью и способен адсорбировать самые различные вещества, в том числе микроорганизмы. Это относится к кирпичным поверхностям, гипсовым штукатуркам, поверхностям из каменных материалов. Анализ работ российских и зарубежных авторов позволил обобщить основные методы борьбы с повреждениями объектов культурного наследия. К химическим методам следует отнести флюатирование, кремнефторизацию, пропитку мономерами. В процессе пропитки бетона мономером с последующей полимеризацией резко уменьшается пористость, что приводит к повышению прочности поверхности бетона и, следовательно, к повышению эксплуатационных характеристик бетонных поверхностей. Наиболее эффективной, на наш взгляд, является гидрофобизация поверхностей как пористых, так и плотных материалов. Из всех доступных материалов самыми эффективными являются кремнийорганические — метилсиликонаты и этилсиликонаты натрия (ГКЖ-10, ГКЖ-11) и обладающий наибольшим гидрофобизирующим эффектом полиэтилсилоксан (ГКЖ-94). Пленка, образующаяся после нанесения гидрофобизаторов, приобретает водоотталкивающие свойства. Эффект несмачиваемости защитного покрытия сохраняется в течение 9—10 лет [35].

На поверхностях объектов культурного наследия вследствие негативного воздействия на их долговечность, а также длительного времени эксплуатации происходит образование трещин, и заделку трещин и сколов необходимо выполнять используя в основном полимерные композиты. Таковыми в первую очередь являются составы на основе эпоксидных смол, высокомолекулярные углеводороды в смеси с карбоновыми кислотами, сополимеры и т. д. «Залечивание» трещин необходимо проводить с использованием специальных методик для каждого конкретного случая. Особое место занимают методы защиты от разрушения кирпичных поверхностей («глиняные» кирпичные поверхности, силикатные кирпичные поверхности). Например, известный объект культурного наследия — дом купца А. М. Шлыкова (учебный корпус «А» ИАиС ВолгГТУ) — выполнен из силикатного кирпича и окрашен красочным составом на основе железного сурика. Срок службы такой окраски пять-шесть лет, так как под воздействием дождя и снега он «смывается», что приводит к разрушению стен здания. В последнее время с появлением фасадных красок нового поколения срок службы таких составов возрос до 15—20 лет, особенно при добавлении в их состав фунгицидов.

Задачи повышения долговечности зданий, строительных конструкций и поверхностей объектов культурного наследия неразрывно связаны с проблемами сохранения высоких эксплуатационных характеристик конструкций из дерева, так как они являются наиболее уязвимыми к течению времени. Объекты культурного наследия XIX—XX вв. зачастую имеют конструкции и элементы, состоящие из дерева (стропила, обрешетки, перекрытия и т. д.), и вопросы защиты от разрушения, вызываемого биологическими агентами (домовые грибы, плесень, гнили, жучки-точильщики, червоточины и др.), приводят к необходимости проводить профилактику биоповреждений различными методами. Следует отметить, что защиту древесины от биоповреждений целесообразно совмещать с защитными мерами от возгорания. Установлено, что многие антипирены одновременно усиливают биоцидные свойства антисептиков. Защита деревянных изделий, конструкций из дерева объектов культурного наследия от биоповреждений должна осуществляться комплексно и включает:

- профилактику биоповреждений;
- применение химических средств защиты (антисептиков, инсектицидов, трудно смываемых масел, влагостойких лакокрасочных покрытий и др.);
- предотвращение увлажнения, обеспечение вентиляции.

В настоящее время для уменьшения эксплуатационного старения и повышения стойкости к биоповреждениям необходимо применять всю номенклатуру фунгицидных препаратов, гидрофобизаторов, лакокрасочных покрытий, антимикробных препаратов (производных гуанидина) и других химических соединений и препаратов, в первую очередь отечественного производства. Следует отметить, что российские предприятия химической отрасли способны удовлетворить потребности в эффективных материалах для защиты древесины от биоповреждений.

Улучшение экологии достигается, как правило, за счет уменьшения автотранспортных перевозок (снижение выбросов газов от автомобильного и железнодорожного транспорта), а также уменьшения проводимых ремонтных

работ зданий и сооружений, что, в свою очередь, оказывает разрушающее воздействие вследствие механических нагрузок, попеременного увлажнения, высыхания, замораживания и оттаивания, т. е. создает определенную агрессивную среду, окружающую объект культурного наследия.

Заключение

На основании проведенного исследования можно определить, что загрязнение атмосферного воздуха является одним из главных факторов риска, который приводит к разрушению фасадов зданий — объектов культурного наследия.

Стоит выделить следующие *специфические виды воздействия загрязняющих веществ*:

- Твердые частицы, поступающие в атмосферный воздух, способны к трем видам взаимодействия аэрозоль-излучения: рассеяние, поглощение входящего и исходящего излучения. Так, выброс углеродных твердых частиц (С) приводит к поглощению входящего солнечного излучения, уменьшается температура и повышается относительная влажность воздуха, что приводит к развитию грибков и микроорганизмов.

- Твердые частицы могут удаляться из атмосферного воздуха путем мокрого или сухого осаждения. При сухом способе осаждения происходит механическое воздействие на поверхность оседания, накопления пылевых частиц на поверхности оседания. При мокром способе осаждения твердые частицы взаимодействуют с газами и оседают в виде капель. Гидролиз твердых частиц, содержащих в своем составе SO_2 , приводит к образованию сернистой кислоты, которая обладает высокой коррозионной способностью по отношению к искусственному камню. Кроме того, искусственный камень теряет свою визуальную составляющую из-за образования на его поверхности гипсовых корок.

- В зонах инженерной и транспортной инфраструктуры дополнительное воздействие на фасады зданий — объектов культурного наследия оказывают металлические частицы, содержащиеся в выхлопных газах и переносимые на поверхности частиц углерода. Они образуют на поверхности фасадов черную корку, тем самым влияя на визуальную составляющую здания.

- Воздействие углекислого газа (CO_2) на силикатный кирпич характеризуется его карбонизацией, которая приводит к увеличению коэффициента размягчения и его повышенной усадке, уменьшается его прочность. Кроме того, углеродные частицы выполняют каталитическую роль в процессе образования серной и азотной кислот, влияют на цвет фасада.

- Дioxid кремния (SiO_2) не способен оказывать коррозионное воздействие на искусственный камень, а, наоборот, используется для защиты от коррозии. При этом ввиду высокой абразивной способности он способен вызывать механическое повреждение элементов фасада, особенно при сильных порывах ветра.

- Хлорид натрия (NaCl) считается наименее эрозионно эффективной солью с точки зрения ее воздействия на искусственный камень. При этом ввиду смещения точки замерзания воды воздействие на строительный материал увеличивается из-за частых циклов оттаивания/замораживания, что приводит к разрушению материала.

Дисперсный состав в изучаемых зонах примерно одинаков, за исключением наличия большей объемной доли частиц менее 10 мкм в зоне инженерной и транспортной инфраструктуры. Полученное различие объясняется вкладом автомобильного транспорта, в выхлопных газах которого большая доля не превышает 10 мкм.

Элементный состав показывает, что в рассматриваемых зонах он примерно одинаков, за исключением большей весовой доли металлических элементов. Такое различие объясняется воздействием автомобильного транспорта на атмосферный воздух (выхлопные и невыхлопные частицы). При этом для двух рассматриваемых зон наблюдается значительная весовая доля кремния (Si) и углерода (C).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Oberdörster G., Oberdörster E., Oberdörster J. An emerging discipline evolving from studies of ultrafine particles // *Environmental Health Perspectives*. 2005. Vol. 113. Pp. 823—839. DOI: 10.1289/ehp.7339.
2. Maharani R. T., Ekasiwi N. N. S., Samodra F. T. B. Minimizing dust in low rise housing design through surface: a literature review // *Journal Sains dan Seni ITS*. 2019. Vol. 8. No. 2. P. 7. DOI: 10.12962/j23373520.v8i2.49733.
3. Esteban-Cantillo O. J., Menendez B., Quesada B. Climate change and air pollution impacts on cultural heritage building materials in Europe and Mexico // *Science of the Total Environment*. 2024. Vol. 921. Pp. 337—341. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.170945.
4. Grøntoft T. Estimation of damage cost to building façades per kilo emission of air pollution in Norway // *Atmosphere*. 2020. Vol. 11. DOI: 10.3390/atmos11070686.
5. О состоянии окружающей среды Волгоградской области в 2024 году : докл. / Е. П. Православнова и др. Волгоград, 2025. 300 с.
6. Di Antonio A. Development of novel methodologies for utilizing low-cost sensors for ambient Particulate Matter measurement // *Apollo* — University of Cambridge Repository. 2020. DOI: 10.17863/CAM.68376.
7. Лясин Р. А. Использование лагранжевой одночастичной модели траекторий hysplit для определения источников естественного загрязнения аэрозольными частицами в г. Волгоград // Актуальные проблемы строительства, ЖКХ и техносферной безопасности : материалы XII Всерос. (с междунар. участием) науч.-техн. конф. молодых исследователей, г. Волгоград, 21—26 апр. 2025. Волгоград, 2025. С. 191—192.
8. Watson J. G., Chow J. C., Chen L.-W. A., Xiaoliang W. Measurement system evaluation for fugitive dust emissions detection and quantification // *Aerosol and Air Quality Research*. 2010. Vol. 11. Pp. 331—350. DOI: 10.4209/aaqr.2011.03.0028.
9. Particle size distribution from municipal solid waste burning over National Capital Territory, India / R. Arya, S. Ahlawat, L. Yadav et al. // *Environmental Sciences Proceedings*. 2022. Vol. 19. DOI: 10.3390/ecas2022-12813.
10. Сизяков В. М., Власов А. А., Бажин В. Ю., Гембицкий В. В. Причины образования глиноземной пыли в электролитическом производстве алюминия // *Записки Горного института*. 2012. Т. 198. С. 207—212.
11. Гаспарян А. С., Азаров В. Н., Кленин И. С., Азарова М. Д. Анализ характеристик пыли природного происхождения Нижнего Поволжья // *Инженер. вестн. Дона*. 2022. № 9(93). С. 200—207.
12. Saltzman E. Marine Aerosols // UC Irvine. Report. 2009. Vol. 3. P. 35.
13. Лясин Р. А., Лупиногин В. В., Евтушенко А. И., Лукьяница С. В. Об определении дисперсного состава цементной пыли седиментационным методом при пофракционном оседании частиц с использованием средств обработки бинарных фотографий // *Инженер. вестн. Дона*. 2022. № 5(89). С. 658—668.
14. Athauda R. S., Asmone A. S., Conejos S. Climate change impacts on facade building materials: a qualitative study // *Sustainability*. 2023. Vol. 15. DOI: 10.3390/su15107893.

15. Long-term impacts of aerosols on precipitation and lightning over the Pearl River Delta megacity area in China / Y. Wang, Q. Wan, W. Meng, F. Liao, H. Tan, R. Zhang // *Atmos. Chem. Phys.* 2011. Vol. 11. Pp. 12421—12436. DOI: 10.5194/acp-11-12421-2011.
16. Li W., Bai X., Pan Z. Air pollution and its impact on stone heritage sites: mechanisms and mathematical models // *Heritage Science.* 2025. Vol. 13. DOI: 10.1038/s40494-025-01820-w.
17. Ling X., Han X. Aerosol impacts on meteorological elements and surface energy budget over an urban cluster region in the Yangtze River Delta // *Aerosol and Air Quality Research.* 2019. Vol. 19. Pp. 1040—1055. DOI: 10.4209/aaqr.2017.12.0602.
18. Kelman I., Grøntoft T. Climate change impact on building surfaces and facades // *International Journal of Climate Change Strategies and Management.* 2011. Vol. 3. Pp. 374—385. DOI: 10.1108/17568691111175669.
19. Ullauri A., Mejía M. C., Carlos J. G., Michelle S. Incidence of environmental factors on travertine façade of heritage buildings in the historic center of Cuenca-Ecuador. A test scenario through digital image processing // *Ge-conservacion.* 2024. Vol. 25. Pp. 80—95. DOI: 10.37558/gec.v25i1.1293.
20. Fassina V. 46-Influenza dell'inquinamento atmosferico sui processi di degrado dei materiali lapidei // In *Bollettino d'Arte "Materiali Lapidari-Problemi Relativi Allo Studio Del Degrado e Conservazione"*. 1987. Pp. 19—47.
21. Fassina V., Favaro M., Crivellari F., Naccari A. The stone decay of monuments in relation to atmospheric environment // *Ann. Di Chim.* 2001. Vol. 91. Pp. 767—774.
22. Vyshkvarkova E., Sukhonos O. climate change impact on the cultural heritage sites in the European part of Russia over the past 60 years // *Climate.* 2023. Vol. 11. P. 50. DOI: 10.3390/cli11030050.
23. Amoroso G., Fassina V. Stone decay and conservation. atmospheric pollution, cleaning, consolidation and protection // *Studies in Conservation.* 1984. P. 474. DOI: 10.2307/1506020.
24. Godts S., Orr S. A., Desarnaud J. NaCl-related weathering of stone: the importance of kinetics and salt mixtures in environmental risk assessment // *Herit. Sci.* 2021. Vol. 9. Iss. 44. DOI: 10.1186/s40494-021-00514-3.
25. Higher diversity and abundance of ammonia-oxidizing archaea than bacteria detected at the Bayon Temple of Angkor Thom in Cambodia / H. Meng, L. Luo, H. Chan, Y. Katayama, Ji-D. Gu // *International Biodeterioration & Biodegradation.* 2016. Vol. 115. DOI: 10.1016/j.ibiod.2016.08.021
26. Kim M., Chang T. S., Rhee C. W., Jin J. H. Feasibility assessment of a microtrac tri-laser diffraction particle size analyzer for use in sedimentary geology: a comparison of grain-size analysis with sieve-pipette method // *Journal of the Geological Society of Korea.* 2010. Vol. 46. Pp. 197—205.
27. Contribution of road vehicle tyre wear to microplastics and ambient air pollution. Sustainability / B. Giechaskiel., T. Grigoratos., M. Mathissen et al. // *Sustainability.* 2024. Vol. 16. No. 2. Pp. 1—31.
28. Bielaczyc P. A., Szczotka A., Woodburn J. Exhaust emissions of particulate matter from light-duty vehicles — an overview and the current situation // *Combustion Engines.* 2017. Vol. 171. Pp. 227—238.
29. Аниканова Т. В., Рахимбаев Ш. М., Кафтаева М. В. К вопросу о механизме углекислотной коррозии строительных материалов // *Фундаментальные исследования.* 2015. № 5-1. С. 19—26.
30. Kucera V., Fitz S. Direct and indirect effects of air pollution on materials, including cultural monuments // *Water, air, soil, pollution.* 1995. Vol. 85. Pp. 153—165. DOI: 10.1007/BF00483697.
31. Effects of air pollution on materials and cultural heritage / J. Tidblad, V. Kucera, M. Ferm et al. // *ICP materials celebrates 25 years of research.* 2012. Pp. 1—16. DOI: 10.1155/2012/496321.
32. Perez-Monserrat E. M., Varas-Muriel M. J., De Buergo A. M., Fort R. Black layers of decay and color patterns on heritage limestone as markers of environmental change // *Geosciences.* 2016. Vol. 6. DOI: 10.3390/geosciences6010004.
33. Silanes for building protection: a case study in systems thinking approach to materials science education / R. Ciriminna, Y. Albo, A. Fidalgo, L. Ilharco, M. Pagliaro // *Education Sciences.* 2020. Vol. 10. DOI: 10.3390/educsci10070171.

34. Nord A. G. Efflorescence salts on weathered building stone in Sweden // Geol. Föreningen I Stockh. Förhandlingar. 1992. Vol. 114. Pp. 423—429.

35. Акчурин Т. К., Лупиногин В. В., Душко О. В., Поляков В. Г. Методы защиты от негативного воздействия окружающей среды объектов культурного наследия // Вестн. Волгогр. гос. архитектур.-строит. ун-та. Сер.: Стр.-во и архитектура. 2025. Вып. 1(98). С. 123—134. DOI: 10.35211/18154360_2025_1_123.

© Черепанов В. Ю., Лупиногин В. В., Акчурин Т. К., Душко О. В.,
Поляков В. Г., Поздняков А. П., 2026

Поступила в редакцию
01.12.2025

Ссылка для цитирования:

Эффективные подходы по защите объектов культурного наследия от загрязняющих факторов атмосферного воздуха / В. Ю. Черепанов, В. В. Лупиногин, Т. К. Акчурин, О. В. Душко, В. Г. Поляков, А. П. Поздняков // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2026. Вып. 1(102). С. 351—366. DOI: 10.35211/18154360_2026_1_351.

Об авторах:

Черепанов Вадим Юрьевич — аспирант, Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1; gsm_2010@mail.ru

Лупиногин Владислав Владимирович — канд. техн. наук, ст. препод. каф. строительных материалов и специальных технологий, Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1; smist2012-2013@yandex.ru

Акчурин Талгат Кадимович — советник РААСН, канд. техн. наук, проф., проф. каф. строительных материалов и специальных технологий, Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1; info@vgasu.ru

Душко Олег Викторович — д-р техн. наук, доц., зав. каф. строительной механики, Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1; ovd28@mail.ru

Поляков Владимир Геннадьевич — д-р экон. наук, проф., зав. каф. городского строительства, экономики и управления проектами, Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1; polana58@mail.ru

Поздняков Андрей Петрович — канд. физ.-мат. наук, доц., доц. каф. математических и естественно-научных дисциплин, Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1; viv_vgasu@mail.ru

**Vadim Yu. Cherepanov, Vladislav V. Lupinogin, Talgat K. Akchurin, Oleg V. Dushko,
Vladimir G. Polyakov, Andrey P. Pozdnyakov**

Volgograd State Technical University

EFFECTIVE APPROACHES TO PROTECT CULTURAL HERITAGE FROM ATMOSPHERIC POLLUTION

The growth of industrial production and active urbanization leads to an increase in the amount of pollutants entering the atmospheric air. Solid particles (dust) are capable of having a direct or indirect impact on the condition of cultural heritage sites. When exposed directly, mechanical abrasion of the surface occurs, as well as corrosion processes caused by the formation of acids from salts. Indirect effects are characterized by changes in climatic conditions, which are determined by three types of interaction (aerosol-radiation): scattering, absorption of incoming and outgoing radiation.

Key words: cultural heritage site, atmospheric air, dust particles, adhesion, PM₁₀, PM_{2.5}, salts, acids, particle deposition, particle distribution modes.

For citation:

Cherepanov V. Yu., Lupinogin V. V., Akchurin T. K., Dushko O. V., Polyakov V. G., Pozdnyakov A. P. [Effective approaches to protect cultural heritage from atmospheric pollution]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2026, iss. 1, pp. 351—366. DOI: 10.35211/18154360_2026_1_351.

About authors:

Vadim Yu. Cherepanov — Postgraduate student, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation; gsm_2010@mail.ru

Vladislav V. Lupinogin — Candidate of Engineering Sciences, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation; smist2012-2013@yandex.ru

Talgat K. Akchurin — Candidate of Engineering Sciences, Professor, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation; info@vgasu.ru; Scopus ID: 57190967539

Oleg V. Dushko — Doctor of Engineering Sciences, Docent, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation; ovd28@mail.ru; ORCID: 0000-0002-3982-1899

Vladimir G. Polyakov — Doctor of Economics, Professor, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation; polana58@mail.ru

Andrey P. Pozdnyakov — Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Docent, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation, viv_vgasu@mail.ru; ORCID: 0000-0001-5983-8834