Работа выполнена в рамках ГПНИ «Природные ресурсы и окружающая среда» на 2021–2025 гг., подпрограмма «Радиация и биологические системы», задание 3.04.05.

Список литературы

1 О Стратегии по обращению с отходами производства и потребления в Республике Беларусь : постановление Совета Министров Респ. Беларусь, 18 авг. 2025 г., № 444 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. – URL: https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=C22500444 (дата обращения: 11.02.2026).

2 **Ашихмина, Т. В.** Анализ негативных экологических последствий эксплуатации полигона твердых коммунальных отходов г. Воронежа на разных этапах его жизненного цикла / Т. В. Ашихмина, Н. В. Каверина, П. С. Куприенко // Региональные геосистемы. – 2020. – Т. 44, № 3. – С. 343–358.

3 Экологический доклад по стратегической экологической оценке по проекту «Стратегии по обращению с отходами производства и потребления в Республике Беларусь», 24 апр. 2025 г. – URL: https://minpriroda.gov.by/uploads/files/2025/doc/Eko Doklad-po-SEO-po-Strategii-po-otxodam.pdf (дата обращения: 11.02.2026).

4 Об утверждении гигиенических нормативов : постановление Совета Министров Респ. Беларусь, 25 янв. 2021 г., № 37 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. – URL: https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=C22 100037 (дата обращения: 25.02.2026).

УДК 551.4(476.13)

СОДЕРЖАНИЕ ДИОКСИДА СЕРЫ В АТМОСФЕРНОМ ВОЗДУХЕ: ИСТОЧНИКИ, МОНИТОРИНГ И ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПОСЛЕДСТВИЯ

А. В. ДУДАРЕВА
Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель, a6323980@gmail.com

Актуальность. Диоксид серы (SO_2) относится к числу наиболее распространенных и опасных загрязнителей атмосферного воздуха, оказывающих комплексное воздействие на здоровье населения и состояние экосистем. По данным Всемирной организации здравоохранения, это соединение входит в перечень шести основных веществ, подлежащих глобальному мониторингу.

Проблема загрязнения воздуха серосодержащими соединениями особенно актуальна для промышленно развитых регионов, где сосредоточены предприятия металлургического комплекса, теплоэнергетики и переработки углеводородного сырья. Вклад цветной металлургии в выбросы SO_2 может достигать 75 % от общего объема вредных эмиссий, а в зоне влияния таких предприятий формируются устойчивые ореолы загрязнения с многократным превышением гигиенических нормативов.

Республика Беларусь, обладая развитой нефтеперерабатывающей, химической и энергетической промышленностью, не является исключением.

Многолетние исследования Института природопользования НАН Беларуси показывают, что выбросы диоксида серы от стационарных источников прошли колоссальную эволюцию: от 22 тысяч тонн в 1950 году до 860 тысяч тонн в 1980-е годы, с последующим снижением до 40–50 тысяч тонн в настоящее время. Однако локальные превышения нормативов продолжают фиксироваться в таких промышленных центрах, как Новополоцк и Мозырь, что требует постоянного мониторинга и анализа ситуации.

Актуальность настоящего исследования обусловлена необходимостью систематизации современных данных о содержании диоксида серы в атмосферном воздухе, анализа природных и антропогенных источников его эмиссии, оценки эффективности систем мониторинга в различных странах и выработки рекомендаций по совершенствованию контроля за этим загрязнителем.

Цель работы. Комплексный анализ содержания диоксида серы в атмосферном воздухе и влияние его на окружающую среду; выявление основных природных и антропогенных источников выбросов, оценка полезных и негативных воздействий на окружающую среду, сравнительный анализ систем мониторинга в разных странах.

Основные результаты. Диоксид серы (SO_2) относится к числу поллютантов, характеризующихся множественностью эффектов воздействия на окружающую среду: соединение участвует в атмосферных химических процессах, модифицирует климатические параметры и оказывает прямое влияние на здоровье населения.

Поступление SO_2 в атмосферу делится на природные и антропогенные источники. К природным относятся вулканизм, геотермальная активность, пожары и разложение органики.

Антропогенные источники обеспечивают до 80 % глобальных эмиссий SO_2. Основные: сжигание угля и мазута в энергетике, металлургия (плавка сульфидных руд), нефтепереработка, химическое производство, морской транспорт. Второстепенные источники включают текстильную и пищевую промышленность [3].

В атмосфере диоксид серы подвергается трансформации. Основным механизмом является окисление SO_2 под действием гидроксильных радикалов (OH) в присутствии водяного пара с образованием серной кислоты (H_2SO_4). H_2SO_4 конденсируется на поверхности аэрозольных частиц (морская соль, минеральная пыль, черный углерод) либо инициирует образование новых мелкодисперсных сульфатных аэрозолей. Образующиеся сульфатные аэрозоли оказывают двойственное воздействие на окружающую среду.

С одной стороны, они обладают способностью рассеивать коротковолновую солнечную радиацию. С другой стороны, сульфатные аэрозоли возвращаются на земную поверхность в форме кислотных дождей, что ведет к

снижению pH почв и водоемов. Кислотные дожди повреждают листовой аппарат растений, подавляют фотосинтез, выщелачивают из почвы биогенные элементы и мобилизуют токсичные ионы алюминия. В водных экосистемах закисление озер и водотоков коррелирует с элиминацией ихтиофауны, амфибий и микроорганизмов. При снижении pH ниже 5 формируются зоны, характеризующиеся практически полным исчезновением гидробионтов. Кислотные дожди ускоряют коррозию строительных материалов и разрушение карбонатных пород (известняков, мраморов), нанося ущерб объектам инфраструктуры и культурного наследия.

Сульфатные аэрозоли являются основным компонентом мелкодисперсных взвешенных частиц размером менее 2,5 мкм (PM2.5). Данные частицы проникают в альвеолярные отделы легких и ассоциированы с обострениями респираторных заболеваний, сердечно-сосудистыми нарушениями и повышенной смертностью.

Основным путем воздействия диоксида серы на организм человека является ингаляционный, что наиболее значимо в условиях городской и промышленной среды. Острые эффекты воздействия включают раздражение слизистых оболочек носа и ротоглотки, затруднение дыхания, ларингоспазм. При контакте с органами зрения возможны химические ожоги и нарушение зрения, при контакте с кожей – дерматиты и ожоги. Лица, страдающие бронхиальной астмой, а также дети демонстрируют повышенную чувствительность к SO_2, причем реакции фиксируются уже при концентрациях от 0,25 ppm [2]. Концентрация 100 ppm классифицируется как непосредственно опасная для жизни.

На рабочих местах металлургических и газоперерабатывающих предприятий зафиксированы повышенные уровни заболеваемости органов дыхания и изменения иммунитета у работников. Исследования, проведенные в Норильске, демонстрируют прямую корреляцию между высокими концентрациями SO_2 в атмосферном воздухе и ростом заболеваемости населения [4].

Мониторинг содержания диоксида серы в выбросах показал следующее. Согласно данным Европейского агентства по окружающей среде, за период 2005–2023 г. выбросы диоксида серы в странах ЕС сократились на 85 %. Данная динамика обусловлена комплексом реализованных мер, включающих: переход на использование топлива с пониженным содержанием серы; оснащение промышленных предприятий установками десульфурации дымовых газов (FGD); замещение ископаемого топлива возобновляемыми источниками энергии.

В США регулирование выбросов SO_2 осуществляется на основе поправок к Закону о чистом воздухе 1990 г. и внедрения рыночного механизма «кэп-энд-трейд» (ограничение и торговля квотами) в рамках Программы кислотных дождей. Реализованные меры позволили снизить выбросы диоксида серы более чем на 90 % за последние десятилетия.

В Индии ситуация характеризуется высоким уровнем выбросов SO_2 от быстрорастущего угольного сектора. В 2015 г. Министерство окружающей среды, лесов и изменения климата Индии ввело нормативы предельных концентраций SO_2 для тепловых электростанций, дифференцированные по дате ввода и мощности станций. В научном сообществе Индии развернулась дискуссия о целесообразности тотального внедрения FGD. В июле 2025 г. правительство Индии выпустило поправку, освобождающую 462 из 600 энергоблоков от обязательной установки FGD, сохранив данное требование только для наиболее загрязненных районов.

Мониторинговая сеть Российской Федерации охватывает крупные промышленные центры. Норильск идентифицируется как одна из территорий с наиболее высокими уровнями загрязнения атмосферного воздуха SO_2. Экспедиционные исследования, выполненные с использованием самолета-лаборатории Ту-134 «Оптик» над акваториями российских арктических морей, показали, что в удаленных районах концентрации SO_2 соответствуют значениям глобального фона.

В Республике Беларусь национальная система мониторинга атмосферного воздуха функционирует под эгидой Белгидромета и охватывает 19 промышленных городов, включая все областные центры, а также Полоцк, Новополоцк, Оршу, Бобруйск, Мозырь, Речицу, Светлогорск, Пинск, Жлобин, Солигорск. Действует 67 пунктов наблюдений, из которых 51 осуществляет отбор проб в дискретном режиме (3–4 раза в сутки) и 16 представляют собой автоматические станции с непрерывным режимом измерений. Программа наблюдений включает определение концентраций основных загрязняющих веществ, в том числе диоксида серы.

Согласно данным Белгидромета, состояние атмосферного воздуха в большинстве промышленных центров Республики оценивается как благополучное. В соответствии со значениями индекса качества воздуха, состояние преимущественно характеризуется как очень хорошее, хорошее и умеренное; доля периодов с удовлетворительным, плохим и очень плохим качеством незначительна. Превышения по диоксиду серы носят эпизодический характер.

Исследование Какареки и Круковской (2024) показывает динамику выбросов SO_2 в Беларуси: от 22 тыс. т в 1950 г. до пиковых значений 860 тыс. т в 1980-е гг., с последующим снижением до 40–50 тыс. т в настоящее время [1]. Данное снижение обусловлено как экономическими факторами, так и внедрением природоохранных технологий. На ОАО «Нафтан» введена в эксплуатацию установка получения элементарной серы по методу Клауса, что обеспечило сокращение выбросов загрязняющих веществ на 14 тыс. т в год, причем по диоксиду серы снижение составило более 40 %. Образующаяся сера используется в качестве сырья на химических предприятиях в Гомеле и Гродно.

Помимо негативных воздействий диоксид серы имеет ряд областей применения в различных отраслях промышленности и сельского хозяйства.

В пищевой промышленности SO_2 используется в качестве консерванта (Е220). В виноделии его применяют для ингибирования нежелательного брожения и окисления вина. Консервант также используется в производстве соков, кондитерских изделий, мясной и рыбной продукции для пролонгации сроков хранения.

Бактерицидные свойства SO_2 обусловливают его применение для фумигации овощехранилищ, складов, а также для обработки зерновых, винограда и цитрусовых. В сельском хозяйстве сера, поступающая через устьичный аппарат растений в форме SO_2 из атмосферы, может обеспечивать до 80 % потребности растений в данном элементе. Вследствие этого в зонах, прилегающих к промышленным центрам, у растений часто не наблюдается дефицита серы.

В промышленности диоксид серы служит сырьем для производства серной кислоты (основное направление использования). Он применяется в качестве отбеливателя для материалов, не подлежащих обработке хлором (солома, шелк, шерсть), а также как дезинфицирующее средство, хладагент и лабораторный растворитель.

В микромолярных концентрациях эндогенный SO_2 участвует в регуляции тонуса гладкой мускулатуры сосудов, процессах передачи сигналов и модуляции воспалительных реакций.

Таким образом, соединение, проявляющее токсические свойства в высоких концентрациях, выполняет физиологические функции в концентрациях эндогенного диапазона.

Выводы. Диоксид серы является приоритетным атмосферным загрязнителем, физико-химические свойства которого (высокая плотность, растворимость в воде) обусловливают его накопление в приземном слое и участие в образовании кислотных осадков и вторичных аэрозолей. Антропогенные источники, прежде всего сжигание топлива, металлургия и нефтепереработка, вносят до 80 % глобальных выбросов SO_2, тогда как природные источники (вулканизм) играют подчиненную роль, но способны вызывать кратковременные климатические аномалии. Сульфатные аэрозоли, образующиеся при окислении SO_2, оказывают двойственное воздействие: с одной стороны, они вызывают отрицательный радиационный форсинг (охлаждение климата), с другой – являются причиной кислотных дождей. Воздействие SO_2 на здоровье человека ассоциировано с патологиями респираторной, сердечно-сосудистой и эндокринной систем, при этом повышенная чувствительность зафиксирована у детей и лиц с бронхиальной астмой. Эффективность систем контроля выбросов в разных странах неодинакова: в ЕС и США достигнуто снижение эмиссий на 85–90 %, тогда как в Индии внедрение си-

стем десульфурации ограничено технико-экономическими факторами. В Беларуси выбросы SO_2 снизились с 860 тыс. т в 1980-х гг. до 40–50 тыс. Мониторинг содержания SO_2 остается основным инструментом выявления зон экологического неблагополучия и оценки эффективности природоохранных мер.

Список литературы

1 **Какареко, В. В.** Тренды содержания диоксида серы в атмосферном воздухе в Беларуси / В. В. Какареко // Природопользование. – 2017. – № 31. – С. 24–34.

2 **Миниярова, Д. В.** Диоксид серы и его влияние на здоровье человека / Д. В. Миниярова // Центральный вестник. – 2019. – Т. 4, № 2 (67). – С. 8–9.

3 **Захарова, В. Г.** Экология химической промышленности / В. Г. Захарова, В. А. Кавардина // Наука молодых – будущее России : сб. ст. 3-й Междунар. науч. конф. перспективных разработок молодых ученых. – 2018. – Т. 5. – С. 210–213.

4 **Жуйкова, Т. В.** Экологическая токсикология : учеб. и практикум для бакалавриата и магистратуры / Т. В. Жуйкова, В. С. Безель. – М. : Юрайт, 2019. – 362 с.

УДК 551.4 (476.13)

ДИНАМИКА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВОДЫ В БЕЛАРУСИ

А. Ф. КАРПЕНКО
Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины,
Республика Беларусь, kaf51@list.ru

Актуальность. Во всех странах мира водные ресурсы, как один из видов природных ресурсов, относятся к национальному достоянию. В Беларуси общая площадь земель, покрытых водой, составляет 13,7 % территории страны, или 2844,5 тыс. га [1, 2]. Проведённая в 2017–2025 г. с использованием средств геоинформационных систем инвентаризация поверхностных водных объектов, расположенных на межселенных территориях, выявила на местности подлежащих охране 24 554 водотока, водоема и родника, а также показала, что наиболее обеспечены поверхностными водными объектами Витебская и Гродненская области, наименее – Гомельская и Брестская [3].

В период последней пятилетки в Беларуси проводилась работа по выполнению отраслевой государственной программы «Охрана окружающей среды и устойчивое использование природных ресурсов на 2021–2025 годы» (Государственная программа), утвержденной постановлением Совета Министров. Реализация мероприятий Государственной программы была направлена на достижение Целей устойчивого развития в Республике Беларусь в соответствии с Повесткой дня в области устойчивого развития до 2030 г. [4]. В настоящее время обеспеченность водными ресурсами в стране по среднемноголетнему общему годовому речному стоку составляет 6,4 тыс. $м^3$ воды в год на душу населения и находится на 0,4 тыс. $м^3$ выше среднеевропейского уровня. Поэтому актуальной задачей является и в даль-