

Использование данных дистанционного зондирования для экологического мониторинга атмосферного воздуха охраняемых природных районов Галапагос

М.Л. Росеро Вальехо¹⁾, О.А. Хлебосолова²⁾*

¹⁾ ФГБОУ ВО «Государственный университет по землеустройству»,
Россия, 105064, г. Москва, ул. Казакова, д. 10/2

²⁾ ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет
имени Серго Орджоникидзе» (МГРИ),
Россия, 117997, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 23

*Адрес для переписки: luurosv@gmail.com

Реферат. В статье представлены результаты оценки состояния атмосферного воздуха по данным дистанционного зондирования за 2001-2025 гг. в районах с высокой природной ценностью Республики Эквадор – в пределах Национального парка Галапагос (7995.4 км²) и Галапагосского морского заповедника (133000 км²). Используются спутниковые показатели аэрозольной оптической глубины (AOD) по данным MODIS, а также столбовые концентрации NO₂, SO₂ и CH₄ по данным Sentinel-5P/TROPOMI. Обработка информации выполнена с применением платформы Google Earth Engine, построены карты распределения и временные ряды для выявления межгодовой изменчивости и аномальных эпизодов. Показано, что вариации аэрозольной нагрузки и газовых загрязнителей обусловлены совокупным воздействием вулканической активности, регионального переноса воздушных масс и антропогенных факторов, связанных с судоходством и туристической нагрузкой. Максимальные концентрации SO₂ приурочены к периодам активизации вулканов Фернандина и Исабела, а аномалии AOD и NO₂ отражают вклад природных и антропогенных источников. Полученные результаты обосновывают высокую информативность спутниковых данных для мониторинга качества атмосферного воздуха в условиях отсутствия разветвлённой наземной сети наблюдений и подтверждают необходимость формирования единой системы экологического мониторинга в пределах охраняемых природных районов Галапагос.

Ключевые слова. Дистанционное зондирование, экологический мониторинг, качество атмосферного воздуха, аэрозольная оптическая глубина, NO₂, SO₂, Национальный парк Галапагос, Галапагосский морской заповедник.

Using remote sensing data for ecological air monitoring in Galapagos protected natural areas

M.L. Rosero Vallejo.^{1)}, O.A. Khlebosolova²⁾*

¹⁾State University of Land Use Planning,
10/2 Kazakova St., 105064, Moscow, Russian Federation

²⁾Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting (MGRI),
23 Miklukho-Maklaya St., 117997, Moscow, Russian Federation

*Correspondence address: *luurosv@gmail.com*

Abstract. This paper presents the results of an assessment of the state of atmospheric air based on remote sensing data for 2001-2025 in areas of high natural value in the Republic of Ecuador – within the Galapagos National Park (7995.4 km²) and the Galapagos Marine Reserve (133.000 km²). Aerosol optical depth (AOD) from MODIS and column amounts of NO₂, SO₂ and CH₄ from Sentinel-5P/TROPOMI were analyzed. Data processing was carried out using the Google Earth Engine platform; spatial distribution maps and time series were generated to detect interannual variability and anomalous events. The results show that variations in aerosol loading and gaseous pollutants are driven by the combined effects of volcanic activity, regional atmospheric transport and anthropogenic factors related to shipping and tourism. Maximum SO₂ concentrations are associated with periods of increased activity of Fernandina and Isabela volcanoes, while AOD and NO₂ anomalies reflect contributions from both natural and anthropogenic sources. The findings demonstrate the high value of satellite observations for air-quality monitoring under conditions of a sparse ground-based network and support the need to develop a unified environmental monitoring system within the Galapagos protected natural areas.

Keywords. Remote sensing, environmental monitoring, air quality, aerosol optical depth, NO₂, SO₂, Galapagos National Park, Galapagos Marine Reserve.

Введение

Современные подходы к организации экологического мониторинга на охраняемых природных территориях мира предусматривают привлечение данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) дополнительно к данным наземных исследований. Использование космических снимков позволяет: (1) наблюдать и сравнивать состояние природных и природно-хозяйственных систем на значительных территориях в режиме реального времени с минимальными финансовыми вложениями, (2) оценивать динамику компонентов природной среды на основе многолетних рядов данных, (3) создавать карты и прогнозные модели с постоянно пополняющейся базой пространственных данных, (4) выявлять развитие неблагоприятных процессов на ранних стадиях, (5) осуществлять управление охраняемыми природными территориями с учетом уникальных особенностей каждого региона.

Анализ международных и национальных документов, а также последних научных публикаций указывает на недостаточное использование данных ДЗЗ для экологического мониторинга на охраняемых природных территориях

(Стишов, Троицкая, 2025). Например, в методических рекомендациях «Организация экологического мониторинга на особо охраняемых природных территориях», выпущенных в России в 2025 году Фондом охраны природы и сохранения редких видов животных «Природа и люди», предусмотрено привлечение данных ДЗЗ только по 6 пунктам из 153. Так во втором разделе Типовой программы экологического мониторинга на федеральных ООПТ «Ландшафты и растительный покров» проведение дистанционных наблюдений предлагается проводить для изучения контуров геоморфологических структур, структурных элементов растительного покрова, первичной продуктивности. В пятом разделе программы «Абиотические объекты и процессы» предусмотрены дистанционные наблюдения за контурами и площадью ледников, фирновых полей, соотношением типов льда в разные периоды в пределах крупных озер и морской акватории, конфигурацией береговой линии, площадью островов, озер, динамикой пойм рек. Вместе с тем, изучение экологического состояния атмосферного воздуха и водных объектов с привлечением данных ДЗЗ не рекомендовано, хотя они крайне важны для анализа многолетней динамики и понимания изменений, происходящих в видовом, экосистемном и ландшафтном разнообразии охраняемых природных территорий (Стишов, Троицкая, 2025).

Целью нашего исследования стало использование данных дистанционного зондирования для экологического мониторинга и выявления многолетних изменений объектов Всемирного природного наследия ЮНЕСКО в Республике Эквадор – Национального парка Галапагос (7995,4 км²) и Галапагосского морского заповедника (133 000 км²) (Constitución de la República del Ecuador, 2008; Ley Orgánica de Régimen Especial para la Provincia de Galápagos, 2015; Galápagos Marine Reserve, 2025).

Исследование проводилось в 2022-2025 гг. и предусматривает создание электронной базы данных (серий космических снимков) за текущее столетие и расчет коэффициентов, таких как AOD (показатель аэрозольной нагрузки атмосферы), NDVI (интегральный показатель состояния растительности), NDTI (спектральный индикатор мутности/взвешенных частиц в поверхностном слое воды). Результаты исследования рассматриваются с позиции долгосрочных изменений и интерпретируются в отношении влияния природных и антропогенных факторов, характера и степени воздействия конкретных источников (Росеро Вальехо, Хлебосолова, 2024; Росеро, Хлебосолова, 2022).

В данном сообщении представлены результаты изучения многолетней динамики по одному компоненту – атмосферному воздуху, представлена оценка пространственно-временной динамики показателей качества атмосферного воздуха за период 2001-2025 гг.

Выбор охраняемых природных районов Галапагос обусловлен их особой значимостью и актуальностью исследований с применением данных ДЗЗ, поскольку наземные измерения состояния атмосферного воздуха с момента их организации специально не проводились. Для национального парка и морского заповедника применение данных ДЗЗ имеет ключевое значение, поскольку это единственный пространственно репрезентативный источник

информации, что обусловлено отсутствием разветвленной постоянно действующей сети наземных мониторинговых пунктов, проблемами сбора стандартизированных данных, логистическими сложностями доступа и обслуживания удалённых участков, недостаточным финансированием и координацией действующих научных программ (Cazorla, Herrera, 2020; Charles Darwin Foundation, 2025).

Изучение имеющихся литературных источников, раскрывающих различные аспекты состояния атмосферного воздуха по тропическим акваториям и вулканически активным островным системам, указывает на высокую эффективность спутниковых наблюдений для оценки аэрозольной нагрузки и газовых примесей в атмосфере (Carn, 2017; Cazorla, Herrera, 2020; Kahl et al., 2015). В ряде исследований, посвящённых архипелагу Галапагос, продемонстрирована возможность выявления вулканических выбросов и регионального переноса аэрозолей, а также загрязняющих газов с использованием данных MODIS, OMI, TROPOMI (Carn, 2017; Kahl et al., 2015; NASA Aura/OMI, 2008). В нашей работе все имеющиеся источники информации впервые объединены для наземных и морских районов ввиду их географического положения и тесной взаимосвязи в отношении развития физико-географических процессов.

Методы и материалы исследования

Практическая реализация поставленной цели предусматривает оценку качества атмосферного воздуха в пределах охраняемых природных районов Галапагос, куда входит 97% площади островов и 40-мильная морская зона вокруг них (Acuerdo МААТЕ-МААТЕ-2025-0044-А, 2025; Galápagos Marine Reserve, 2025). В ходе исследования был проведен поиск и анализ материалов из открытых источников информации, построены графики многолетних изменений, выявлено влияние природных факторов (вулканическая деятельность, глобальные климатические процессы, колебания Эль-Ниньо и Ла-Нинья) и антропогенных воздействий (Garreaud, 2021).

Использованы данные из различных источников за период 2001-2025 гг.: данные MODIS (спутники Terra/Aqua) для анализа аэрозольной оптической глубины (AOD) над архипелагом, применяемые в качестве индикатора суммарной аэрозольной нагрузки в атмосфере и косвенного показателя уровня загрязнения воздуха; данные Sentinel-5P/TROPOMI для изучения столбовых концентраций NO_2 , SO_2 и CH_4 , позволяющие детализировать источники загрязнения, включая судоходство, туристическую активность и локальные антропогенные выбросы, а также отслеживать характерные для региона вулканические выбросы (Copernicus Sentinel-5P, 2025; NASA Aura/OMI, 2008); данные Landsat и Sentinel-2. Однако в этом сообщении подробно рассматриваются результаты, полученные для показателей атмосферного воздуха (AOD, NO_2 , SO_2).

Обработка данных выполнялась в геоинформационной облачной среде Google Earth Engine. Для каждого продуктового набора (MODIS AOD,

Sentinel-5P NO_2 , SO_2 , CH_4) осуществлялись: фильтрация по качественным флагам и облачности с целью исключения некорректных измерений и пикселей с низким качеством; пространственное усреднение по полигонам охраняемых природных территорий архипелага (наземная часть Национального парка Галапагос и прилегающие участки морской резервной зоны); формирование временных рядов (месячных и годовых композитов) для периода 2001-2025 гг. (AOD) и 2018-2025 гг. (NO_2 , SO_2 , CH_4); расчёт статистических характеристик (среднее, медиана, стандартное отклонение) и аномалий относительно многолетнего среднего уровня.

Аномальные эпизоды определялись как отклонения, превышающие фоновые значения более чем на одну-две величины стандартного отклонения для соответствующего месяца или сезона. Для интерпретации выявленных аномалий использовались сведения о вулканической активности в регионе (извержения вулканов Вулф, Ла-Кумбре и др.), данные о лесных пожарах в Южном полушарии, а также информация о фазах Эль-Ниньо и Ла-Нинья, особенностях циркуляции атмосферы в Южно-Тихоокеанском регионе (Kahl et al., 2015; Jaffe et al., 2021; Garreaud, 2021).

Отдельное внимание уделялось возможным искажениям спутниковых оценок, что обусловлено: влиянием морских аэрозолей и высокой влажности воздуха в прибрежной зоне, что может приводить к завышенным значениям AOD; высокой вулканической активностью, которая способна маскировать антропогенные источники SO_2 ; особенностями пространственного разрешения и смешения сигналов над сложной береговой линией. Для минимизации этих эффектов анализ проводился с учётом сезонных климатических условий и известной хронологии вулканических событий за исследуемый период. В целом такой подход позволяет обеспечить целостное понимание динамики атмосферных процессов в условиях ограниченной наземной наблюдательной сети и выявлять долгосрочные тенденции (2001-2025 гг.) и кратковременные аномальные эпизоды с высокой детализацией (Cazorla, Herrera, 2020; Copernicus Sentinel-5P, 2025).

Результаты и анализ

Комплексная оценка состояния атмосферного воздуха в пределах охраняемых природных районов Галапагос за период 2001-2025 гг. включает анализ пространственно-временной динамики аэрозольной нагрузки (AOD) и концентраций газовых загрязнителей (NO_2 , SO_2).

1. Межгодовая динамика аэрозольной оптической глубины (AOD)

Анализ временных рядов AOD по данным MODIS за период 2001-2025 гг. показывает выраженные положительные аномалии в отдельные годы, в частности в 2015 и 2021 гг. (рис. 1).

Детальное исследование показало, что пиковые значения AOD обусловлены совокупностью процессов различного происхождения. В 2015 г. ключевым фактором стало извержение вулкана Вулф на острове Исабела, произошедшее в мае и сопровождавшееся значительным выбросом пепла и газов в

тропосфере (Kahl et al., 2015). Это привело к локальному увеличению концентрации аэрозолей над архипелагом. Дополнительный вклад могли вносить межконтинентальные потоки Сахаро-Сахельской минеральной пыли, сформированные под влиянием усиления африканского восточного струйного течения и субтропического антициклона Северной Атлантики, что способствовало переносу аэрозольных масс в восточную часть Тихого океана, включая рассматриваемый район (Gimeno et al., 2016).

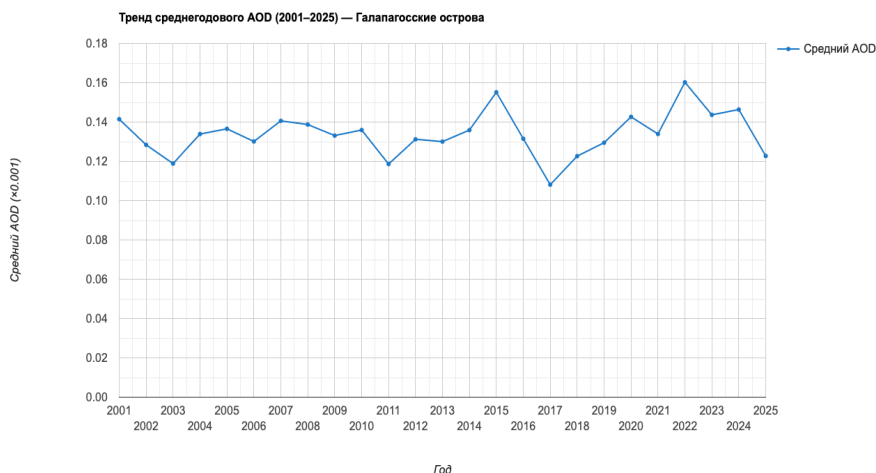


Рисунок 1. Межгодовая динамика аэрозольной нагрузки в атмосфере Галапагосских островов по данным MODIS за период 2001-2025 гг.

Figure 1. Interannual dynamics of aerosol loading in the atmosphere of the Galapagos Islands based on MODIS data for 2001-2025

Важную роль имеет стратосферная составляющая: извержение чилийского вулкана Кальбуко в апреле 2015 г. сопровождалось инъекцией сульфатных аэрозолей на высоты ≥ 15 км, а их дисперсия в течение нескольких месяцев через меридиональные стратосферные потоки способствовала повышению фоновой AOD в экваториальной зоне Южного полушария (Textor, 2006; Zhang, 2020).

Пик AOD в 2021 г. в большей степени связан с пирогенными аэрозолями, образовавшимися в результате масштабных лесных пожаров в Австралии в 2019-2020 гг. Высокие концентрации аэрозолей проникли в стратосферу посредством пирокумулятивных процессов и сохранялись на повышенных уровнях в Южном полушарии вплоть до середины 2021 г., что способствовало увеличению фоновой оптической толщины атмосферы над изучаемым районом (Jaffe et al., 2021; Kalashnikova et al., 2022). Дополнительный вклад могли вносить адвекция органо-углеродных аэрозолей из тропических и субтропических регионов Южной Америки (González et al., 2016).

Таким образом, зафиксированные аномалии AOD в 2015 и 2021 гг. отражают синтез локальных вулканогенных выбросов, межконтинентального переноса минеральной пыли и длительного присутствия пирогенных аэрозолей в стратосфере, демонстрируя доминирующую роль региональных и

глобальных источников аэрозольного вещества в формировании оптических характеристик атмосферы экваториальной зоны Тихого океана в пределах охраняемых природных районов Галапагос.

2. Межгодовая динамика тропосферного диоксида азота (NO_2)

Анализ временных рядов тропосферного NO_2 по данным Sentinel-5P/TROPOMI за период 2018-2024 гг. показал наличие положительных аномалий концентраций в 2018 и 2021 гг. (рис. 2).

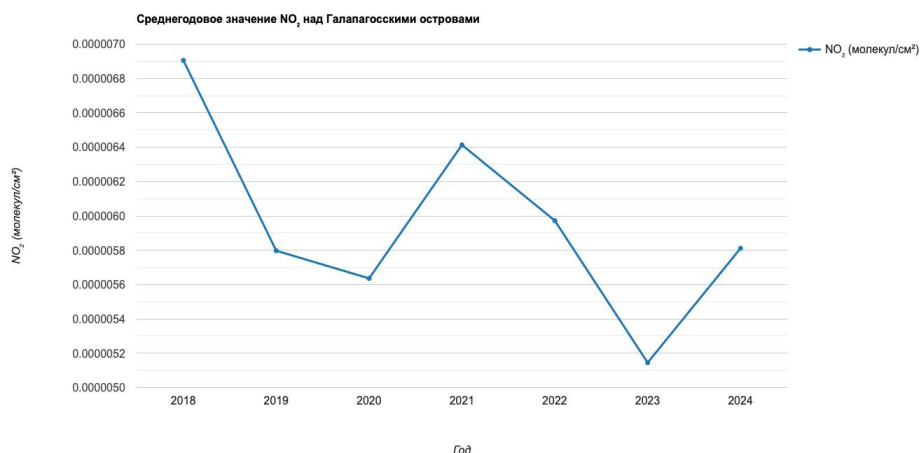


Рисунок 2. Межгодовая динамика концентрации тропосферного NO_2 над архипелагом Галапагос по данным Sentinel-5P за период 2018-2024 гг.

Figure 2. Interannual dynamics of tropospheric NO_2 concentration over the Galapagos Archipelago based on Sentinel-5P data for 2018-2024.

С учётом низкой степени индустриализации и небольшой плотности населения провинции полученные пиковые значения не могут быть объяснены исключительно локальными антропогенными источниками, что свидетельствует о сложном взаимодействии процессов на локальном, региональном и глобальном уровнях.

Повышение концентрации NO_2 в 2018 г., вероятно, связано с увеличением туристской активности, сопровождающейся ростом использования транспортных средств и сжиганием ископаемого топлива, а также с определёнными метеорологическими условиями (снижением уровня осадков, изменениями в циркуляции атмосферных масс), способствовавшими накоплению загрязнителей в приземном слое (Cazorla, Herrera, 2020; Wolfe et al., 2017). Существенную роль имеет межрегиональный перенос загрязняющих веществ с континентальных территорий побережья Южной Америки, особенно из урбанизированных и промышленных зон Эквадора и Перу под влиянием Южно-Тихоокеанского антициклона и восточных пассатов (González et al., 2016; Garreaud, 2021).

Пик концентраций NO_2 в 2021 г. обусловлен сочетанием нескольких факторов глобального масштаба. Масштабные лесные пожары в Австралии и Амазонии 2019-2020 гг. привели к выбросу значительных масс пирогенных

аэрозолей и газов, которые с помощью пирокумулятивных процессов частично проникли в стратосферу, изменяя химический состав тропосферы в Южном полушарии (Jaffe et al., 2021; Kalashnikova et al., 2022). Дополнительно циркуляционные аномалии, связанные с переходной фазой между явлениями Ла-Нинья и Эль-Ниньо в 2020-2021 гг., могли способствовать усилению адвекции загрязнённого воздуха и химических предшественников NO_2 из различных регионов (Garreaud, 2021).

Аналогичные закономерности выявлены в исследованиях AOD: отмеченные аномалии в 2015 и 2021 гг. объясняются совокупностью вулканогенных выбросов, межконтинентального переноса минеральной пыли и долговременного присутствия пирогенных аэрозолей. Наблюдаемые аномалии NO_2 в 2018 и 2021 гг. подчёркивают необходимость комплексного междисциплинарного подхода к пониманию экологического состояния атмосферы в удалённых и чувствительных экосистемах экваториальной части Тихого океана.

3. Межгодовая динамика тропосферного диоксида серы (SO_2)

Анализ временных рядов тропосферного SO_2 по данным Sentinel-5P за период 2018-2025 гг. выявил два выраженных пика концентраций – в июне 2022 г. и в мае 2024 г. (рис. 3).

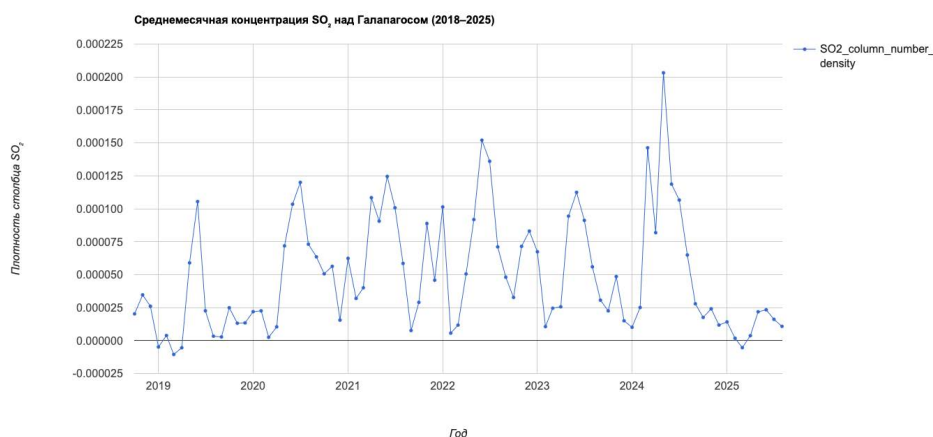


Рисунок 3. Межгодовая динамика концентрации тропосферного SO_2 над архипелагом Галапагос по данным Sentinel-5P за период 2018-2025 гг.

Figure 3. Interannual dynamics of tropospheric SO_2 concentration over the Galapagos Archipelago based on Sentinel-5P data for 2018-2025

Отмеченные аномалии тесно связаны с вулканической активностью крупнейших действующих вулканов архипелага – Фернандина и Исабела. Вулканические выбросы SO_2 являются доминирующим источником загрязнения в регионе, формируя природный фон, который существенно варьирует в зависимости от интенсивности извержений и фаз дегазации (Carn, 2017; Kahl et al., 2015).

Населенные пункты, расположенные в непосредственной близости с охраняемыми районами Галапагос, характеризуются незначительной численностью и плотностью населения и отсутствием промышленного производ-

ства, однако нельзя полностью исключать вклад человека в эмиссию SO_2 . Рост туристической активности (особенно в сезон пиковой посещаемости) сопровождается увеличением судоходства и авиационного трафика, что ведёт к дополнительным выбросам SO_2 и других загрязнителей (Cazorla, Herrera, 2020; Wolfe et al., 2017). По своим масштабам они существенно уступают вулканическим, но могут оказывать влияние на базовые уровни загрязнения и вносить дополнительную вариабельность в периоды относительного снижения вулканической активности.

Пики концентраций SO_2 в июне 2022 и мае 2024 гг., вероятно, связаны с мощными извержениями или периодами активной дегазации магматических газов, сопровождающимися образованием крупных масс вулканических аэрозолей (Carn, 2017; NASA Aura/OMI, 2008). Эти процессы не только повышают локальные концентрации SO_2 , но и способствуют переносу загрязнителей на значительные расстояния под воздействием ветровых потоков, влияя на качество воздуха. Метеорологические условия в эти месяцы (снижение осадков, изменения направления пассатов) могли способствовать накоплению загрязняющих веществ в приземном слое атмосферы, усиливая эффект пиковых концентраций.

Значительное влияние на вариабельность SO_2 оказывает региональный перенос загрязняющих веществ, связанный с циркуляцией воздушных масс под воздействием южнотихоокеанского антициклона и восточных пассатов (González et al., 2016). Глобальные климатические явления (Эль-Ниньо, Ла-Нинья) также косвенно влияют на распределение SO_2 через изменение погодных условий и структуры циркуляции (Garreaud, 2021).

В совокупности полученные данные подчёркивают сложный характер атмосферного загрязнения диоксидом серы в пределах охраняемых природных районов Галапагос, где природные вулканические источники взаимодействуют с метеорологическими, климатическими и, в меньшей степени, антропогенными факторами. Для всестороннего понимания и точного прогнозирования влияния выбросов необходимы междисциплинарные исследования, включающие атмосферное моделирование и сопоставление с другими показателями (AOD, NO_2 и др.).

Обсуждение

Полученные результаты имеют непосредственное отношение к задачам экологического мониторинга в пределах охраняемых природных районов Галапагос. Выявленные аномалии концентраций SO_2 , NO_2 и AOD отражают состояние атмосферной среды, от которого напрямую зависят устойчивость экосистем, существование эндемичных видов и в целом функционирование природных сообществ.

Повышенные уровни SO_2 в периоды вулканической активности оказывают негативное воздействие на растительность, вызывая химический стресс и нарушая физиологические процессы у чувствительных видов, а также влияя на качество прибрежных вод при осаждении сульфатных аэрозолей (Carn,

2017; Textor, 2006). Увеличение аэрозольной нагрузки может снижать прозрачность атмосферы и уровень солнечной радиации, что влияет на фотосинтетическую активность и продуктивность наземных экосистем (Textor, 2006).

Присутствие NO_2 в атмосфере, связанное с природными и антропогенными источниками, создаёт риск образования вторичных загрязнителей, включая тропосферный озон и нитратные аэрозоли, способных воздействовать на биоту и качество среды обитания. В условиях изолированных островных систем с высокой долей эндемичных видов такие факторы приобретают особую значимость.

Результаты исследования подтверждают, что спутниковые данные являются эффективным инструментом для мониторинга качества атмосферного воздуха в регионах с ограниченной наземной сетью наблюдений (Cazorla, Herrera, 2020; Copernicus Sentinel-5P, 2025). Они позволяют выявлять периоды повышенного риска, оценивать относительный вклад природных и антропогенных факторов и формировать основу для принятия решений в области природоохранной политики и управления туризмом и рекреацией на охраняемых природных территориях. Вместе с тем, важно учитывать ограничения спутниковых данных, связанные с пространственным разрешением снимков, влиянием облачности, морских аэрозолей и влажности. Для повышения надёжности интерпретации целесообразно комбинировать спутниковые наблюдения с доступными данными наземных измерений и результатами атмосферного моделирования – для охраняемых природных районов Галапагос это аналогичные участки в прибрежно-материковой части Эквадора (Cazorla, Herrera, 2020; Secretaría de Ambiente de Quito, 2025).

Заключение

На основе данных MODIS и Sentinel-5P за период 2001-2025 гг. выполнена оценка динамики показателей состояния атмосферного воздуха в пределах охраняемых территорий Национального парка Галапагос и Галапагосского морского заповедника. Установлена выраженная межгодовая изменчивость аэрозольной оптической глубины (AOD) и концентраций газовых примесей (NO_2 , SO_2) над архипелагом, отражающая сочетанное влияние глобальных, региональных и локальных факторов. Показано, что максимальные значения SO_2 приурочены к периодам активной вулканической деятельности вулканов Фернандина и Исабела, что подтверждает доминирующую роль природного вулканического источника в формировании фона диоксида серы (Carn, 2017; Kahl et al., 2015). Выявленные аномалии AOD в отдельные годы обусловлены совокупностью вулканических выбросов, межконтинентального переноса минеральной пыли и пирогенных аэрозолей от крупных лесных пожаров в Южном полушарии (Gimeno et al., 2016; Jaffe et al., 2021; Kalashnikova et al., 2022). Вариации NO_2 отражают смешанную природу источников и формируются под влиянием регионального переноса загрязнителей, локальной антропогенной нагрузки, связанной с транспортом и туризмом, а также глобальных циркуляционных и климатических процессов

(Cazorla, Herrera, 2020; González et al., 2016; Wolfe et al., 2017). Результаты исследования подтверждают высокую информативность спутниковых данных для оценки качества атмосферного воздуха в условиях отсутствия разветвлённой наземной сети наблюдений и демонстрируют возможность использования дистанционного зондирования в качестве базового инструмента экологического мониторинга. Полученные выводы обосновывают необходимость включения данных дистанционного зондирования для изучения состояния атмосферного воздуха в число приоритетных направлений экологического мониторинга, программ управления природоохранной, научной и туристско-рекреационной деятельностью охраняемых природных районов Галапагос и в широкой мировой практике.

Список литературы

Росеро Вальехо, М.Л., Хлебосолова, О.А. (2024) История природопользования и перспективы совершенствования системы экологического мониторинга на Галапагосских островах (Республика Эквадор), *Известия высших учебных заведений. Геология и разведка*, т. 66, № 2, с. 141-149, doi: 10.32454/0016-7762-2024-66-2-141-149.

Росеро, М., Хлебосолова, О.А. (2022) .*Система охраняемых природных районов Эквадора и перспективы её устойчивого развития на примере Галапагосских островов, Устойчивое развитие особо охраняемых природных территорий*, т. 9, Сборник статей IX Всероссийской (национальной) научно-практической конференции (6-8 октября 2022, Сочи), Сочи, ГКУ КК «Природный орнитологический парк в Имеретинской низменности», Донской издательский центр, с. 347-354.

СТИШОВ, М.С., ТРОИЦКАЯ, Н.И. (2025) *Организация экологического мониторинга на особо охраняемых природных территориях*, Методические рекомендации, 140 с.

Acuerdo MAATE-MAATE-2025-0044-A (2025) *Descripción de límites y zona de la Reserva de Recursos Marinos – 4 millas nauticas*, URL: <https://ambiente.gob.ec> (дата обращения: 14.08.2025).

Constitución de la República del Ecuador (2008) art. 258. *Creación del régimen de administración especial para la provincia de Galapagos*, URL: <https://en.unesco.org> (fecha de consulta: 14.08.2025).

Carn, S.A. (2017) Satellite-based monitoring of volcanic sulfur dioxide emissions, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, vol. 344, pp. 117-131.

Cazorla, M., Herrera, E. (2020) Air quality in the Galapagos Islands: A baseline view from remote sensing and in situ measurements, *Meteorological Applications*, vol. 27, e1878, doi: 10.1002/met.1878. URL: <https://rmets.onlinelibrary.wiley.com> (дата обращения: 14.08.2025).

Charles Darwin Foundation (2025) *Science Plan, programas de monitoreo (long-term monitoring, subtidal and vegetation monitoring)*. URL: <https://www.darwinfoundation.org> (дата обращения: 14.08.2025).

Copernicus Sentinel-5P (2025) *Level-2 Nitrogen Dioxide (NO₂) product description*, URL: <https://sentinel.esa.int> (дата обращения: 12.08.2025).

Galápagos Marine Reserve (2025) *Datos sobre rea protegida (≈133 km² / ≈51 000 ha)*. URL: <https://education.nationalgeographic.org> (дата обращения: 14.08.2025).

Garreaud, R. (2021) Influence of El Nio and La Nia on atmospheric circulation and air quality in the Pacific region, *Climate Dynamics*, vol. 54, no. 4, pp. 321-335, doi: 10.1007/s00382-021-05678.

Gimeno, B., Kalashnikova, O., Laurent, P. (2016) Intercontinental transport of mineral dust and aerosols: observations and modeling, *Atmospheric Science and Technology*, vol. 10, no. 6, pp. 432-447.

González, P., Sánchez, V., Martnez H. (2016) Transporte interregional de contaminantes en Sudamérica: impacto en ecosistemas costeros, *Atmospheric Chemistry and Physics*, vol. 16, no. 12, pp. 7890-7908, doi: 10.5194/acp-16-7890-2016.

Jaffe, D., Smith, R., Chen, A. (2021) Impact of large wildfires on tropospheric air composition in the Southern Hemisphere, *International Journal of Atmospheric Research*, vol. 82, no. 1, pp. 101-119, doi: 10.1016/j.atmosres.2020.105.

Kahl, J.D.W., et al. (2015) Volcanic gas emissions at Galápagos volcanoes. Temporal and spatial patterns, *Geophysical Research Letters*, vol. 42, no. 6, pp. 1981–1989.

Kalashnikova, O., Hendrix, M., Li, S. (2022) Pyrogenic aerosols in the stratosphere: sources, transport and atmospheric impact, *Journal of Atmospheric Chemistry*. vol. 94, no. 3, pp. 275-298, DOI: 10.1007/s10874-022-09422-x.

Ley Orgánica de Régimen Especial para la Provincia de Galápagos (LOREG)(2015) Texto oficial, URL: <https://gobiernogalapagos.gob.ec> (дата обращения: 14.08.2025).

NASA Aura/OMI (2008) *OMSO2 – Sulphur Dioxide Product README and updates*, URL: <https://so2.gsfc.nasa.gov> (дата обращения: 11.08.2025).

Secretaría de Ambiente de Quito (2025) *REMMAQ – Red Metropolitana de Monitoreo Atmosférico de Quito, official portal*, URL: <https://ambiente.quito.gob.ec> (дата обращения: 14.08.2025).

Textor, C. (2006) Impact of volcanic aerosols on climate, *Atmospheric Chemistry and Physics*, vol. 6, pp. 2707-2735.

Wolfe, T., García M., Rodríguez, L. (2017) Влияние туризма на атмосферное загрязнение в экологически чувствительных регионах, *Journal of Environmental Research*, vol. 45, no. 3, pp. 256-270.

Zhang, Q. (2020) Aerosol Optical Depth variations related to volcanic activity in tropical regions, *Atmospheric Environment*, vol. 234, Article 117551.

References

Rosero Vallejo, M.L., Khlebosolova, O.A. (2024) Istoriya prirodopolzovaniya i perspektivy sovershenstvovaniya sistemy ekologicheskogo monitoringa na Galapagosskikh ostrovakh (Respublika Ekvador) [History of natural resource use and prospects for improving the environmental monitoring system in the Galapagos Islands (Republic of Ecuador)]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Geologiya i razvedka*, vol. 66, no. 2, pp. 141-149, doi: 10.32454/0016-7762-2024-66-2-141-149. [in Russian].

Rosero M., Khlebosolova O.A. (2022) *Sistema okhranyaemykh prirodnnykh rayonov Ekvadora i perspektivy ee ustoichivogo razvitiya na primere Galapagosskikh ostrovov* [System of protected natural areas of Ecuador and prospects for sustainable development: the case of the Galapagos Islands]. *Ustoichivoe razvitie osobo okhranyaemykh prirodnnykh territorii*. Vol. 9: Collection of papers of the IX All-Russian (National) Scientific and Practical Conference (October 6-8, 2022, Sochi). Sochi: GКУ КК «Prirodnyi ornitologicheskii park v Imeretinskoi nizmennosti», Donskoi izdatelskii tsentr, pp. 347-354. [in Russian].

Stishov, M.S., Troitskaya, N.I. (2025) *Organizatsiya ekologicheskogo monitoringa na osobo okhranyaemykh prirodnnykh territoriyakh. Metodicheskie rekomendatsii* [Organization of environmental monitoring in specially protected natural areas. Methodological recommendations], Moscow, 140 p. [in Russian].

Auerdo MAATE-MAATE-2025-0044-A (2025) *Description of boundaries and the Marine Resources Reserve zone – 4 nautical miles*, URL: <https://ambiente.gob.ec> (accessed: 14.08.2025).

Constitucion de la Republica del Ecuador (2008) Art. 258. *Creation of the special administrative regime for the province of Galapagos*, URL: <https://en.unesco.org> (accessed: 14.08.2025).

Carn, S.A. (2017) Satellite-based monitoring of volcanic sulfur dioxide emissions, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, vol. 344, pp. 117-131.

Cazorla, M., Herrera, E. (2020) Air quality in the Galapagos Islands: A baseline view from remote sensing and in situ measurements, *Meteorological Applications*, vol. 27, e1878, doi: 10.1002/met.1878. URL: <https://rmets.onlinelibrary.wiley.com> (accessed: 14.08.2025).

Charles Darwin Foundation (2025) *Science Plan, monitoring programs (long-term monitoring, subtidal and vegetation monitoring)*. URL: <https://www.darwinfoundation.org> (accessed: 14.08.2025).

Copernicus Sentinel-5P (2025) *Level-2 Nitrogen Dioxide (NO₂) product description*, URL: <https://sentinel.esa.int> (accessed: 12.08.2025).

Galapagos Marine Reserve (2025) *Protected area data* ($\approx 133\,000\text{ km}^2 / \approx 51\,000\text{ sq mi}$). URL: <https://education.nationalgeographic.org> (accessed: 14.08.2025).

Garreaud, R. (2021) Influence of El Niño and La Niña on atmospheric circulation and air quality in the Pacific region, *Climate Dynamics*, vol. 54, no. 4, pp. 321-335, doi: 10.1007/s00382-021-05678.

Gimeno, B., Kalashnikova, O., Laurent, P. (2016) Intercontinental transport of mineral dust and aerosols: observations and modeling, *Atmospheric Science and Technology*, vol. 10, no. 6, pp. 432-447.

González, P., Sánchez, V., Martínez H. (2016) Transporte interregional de contaminantes en Sudamérica: impacto en ecosistemas costeros, *Atmospheric Chemistry and Physics*, vol. 16, no. 12, pp. 7890–7908, doi: 10.5194/acp-16-7890-2016.

Jaffe, D., Smith, R., Chen, A. (2021) Impact of large wildfires on tropospheric air composition in the Southern Hemisphere, *International Journal of Atmospheric Research*, vol. 82, no. 1, pp. 101-119, doi: 10.1016/j.atmosres.2020.105.

Kahl, J.D.W., et al. (2015) Volcanic gas emissions at Galápagos volcanoes. Temporal and spatial patterns, *Geophysical Research Letters*, vol. 42, no. 6, pp. 1981-1989.

Kalashnikova, O., Hendrix, M., Li, S. (2022) Pyrogenic aerosols in the stratosphere: sources, transport and atmospheric impact, *Journal of Atmospheric Chemistry*. vol. 94, no. 3, pp. 275-298, doi: 10.1007/s10874-022-09422-x.

Ley Organica de Regimen Especial para la Provincia de Galapagos (LOREG) (2015) Official text, URL: <https://gobiernogalapagos.gob.ec> (accessed: 14.08.2025).

NASA Aura/OMI (2008) *OMSO2 – Sulphur Dioxide Product README and updates*, URL: <https://so2.gsfc.nasa.gov> (accessed: 11.08.2025).

Secretaria de Ambiente de Quito (2025) *REMMAQ – Metropolitan Atmospheric Monitoring Network of Quito, official portal*, URL: <https://ambiente.quito.gob.ec> (accessed: 14.08.2025).

Textor, C. (2006) Impact of volcanic aerosols on climate, *Atmospheric Chemistry and Physics*, vol. 6, pp. 2707-2735.

Wolfe, T., Garcia, M., Rodriguez, L. (2017) Vliyanie turizma na atmosfernoe zagryaznenie v ekologicheski chuvstvitelnykh regionakh [Impact of tourism on atmospheric pollution in ecologically sensitive regions], *Journal of Environmental Research*, vol. 45, no. 3, pp. 256-270. [in Russian].

Zhang, Q. (2020) Aerosol Optical Depth variations related to volcanic activity in tropical regions, *Atmospheric Environment*, vol. 234, Article 117551.

Статья поступила в редакцию (Received): 29.09.2025.

Статья доработана после рецензирования (Revised): 22.04.2026.

Для цитирования / For citation:

Росеро Вальехо, М.Л., Хлебосолова, О.А. (2026) Использование данных дистанционного зондирования для экологического мониторинга атмосферного воздуха охраняемых природных районов Галапагос, *Экологический мониторинг и моделирование экосистем*, т. XXXVII, № 1-2, с. 171-185, doi:10.24412/2782-3237-2026-1-2-171-185.

Rosero Vallejo, M.L., Khlebosolova, O.A. (2026) Using remote sensing data for ecological air monitoring in Galapagos protected natural areas, *Ecological Monitoring and Modeling of Ecosystems*, vol. XXXVII, no. 1-2, pp. 171-185, doi:10.24412/2782-3237-2026-1-2-171-185.