

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

# ИССЛЕДОВАНИЯ ПОСЛЕДСТВИЙ СИЛЬНОГО ИЗВЕРЖЕНИЯ ВУЛКАНА РАЙКОКЕ В ЦЕНТРАЛЬНЫХ КУРИЛАХ В 2019 г. С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ

© 2024 г. В. Г. Бондур<sup>1</sup>, \*, О. С. Воронова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Научно-исследовательский институт аэрокосмического мониторинга “АЭРОКОСМОС”, Москва, Россия

\*E-mail: office@aerocosmos.info

Поступила в редакцию 04.10.2024 г.

С использованием различных спутниковых данных исследовано пространственно-временное распространение содержания диоксида серы в период сильного эксплозивного извержения стратовулкана Райкоке, происходившего в 2019 г. Определена общая масса выброшенного SO<sub>2</sub> на высоте 15 км. По результатам анализа многолетних временных рядов изменения аэрозольной оптической толщины, оценено влияние стратосферных аэрозолей на озоновый слой Земли и выявлены изменения содержания озона в столбе атмосферы. Показано, что после извержения этого вулкана значения оптической толщины стратосферного аэрозоля увеличились (до величины 2.3), что связано с активным преобразованием диоксида серы в серную кислоту и формированием шлейфов сульфатных аэрозолей. Обнаружено резкое снижение содержания озона (на 73 DU) после окончания вулканической деятельности, за которым последовало и значительное понижение температуры в стратосфере (на 8–17°C). Установлено, что повышенные значения извлеченной массы SO<sub>2</sub> сохранялись спустя несколько дней после извержения, а затем экспоненциально уменьшалась со временем. Установлено также, что изменения общего содержания озона в столбе атмосферы согласуются с вариациями температур в стратосфере.

*Ключевые слова:* дистанционное зондирование Земли, спутниковые данные, природные катастрофы, вулканы, диоксид серы, аэрозольная оптическая толщина

DOI: 10.31857/S0205961424060037, EDN: RQUZJL

### ВВЕДЕНИЕ

Одним из природных источников загрязнения атмосферы является вулканическая активность, в результате которой выбрасывается огромное количество пепла и газовых примесей (Лаверов и др., 2005). По характеру выбросов материалов на поверхность Земли следует отметить два принципиально разных типа вулканических извержений: интрузивный и эксплозивный. Интрузивный тип характеризуется относительно спокойным и длительным выдавливанием магмы через разломы коры, сопровождающимся слабыми взрывами, которые вызваны, вероятно, попаданием воды в жерло вулкана (Федотов, 2006). Эксплозивный тип, характеризующийся сильными выбросами вулканического материала в атмосферу до 20 км и более, является наиболее опасным для населения и авиации в связи с высокой энергетикой вулканогенного процесса и слабой предсказуемостью (Ивлев, и др., 2008; Маневич и др., 2024). Даже небольшие вулканические извержения могут привести к выбросу сотен мегатонн вулканического пепла в тропосферу и стратосферу (Watson et al., 2016; Reed, et al., 2018).

Перенос пепла от извержения вулканов в процессе атмосферной циркуляции возможен на тысячи километров (Krotkov et al., 2008; Watson et al., 2016), шлейфы которых представляют значительный риск для авиации (Guffanti et al., 2010). При попадании самолетов в пепловые облака возникает реальная угроза жизни людей на борту. Помимо решения задачи о снижении риска для авиации, существует значительный интерес к количественной оценке концентрации и объема частиц и газовых примесей, из-за их воздействия на климат (Robock, 2000), и окружающую среду (Thordarson and Self, 2003).

Сильные вулканические извержения эксплозивного типа вносят существенный вклад в изменчивость оптических характеристик атмосферы и, следовательно, в глобальные изменения климата (Fisher et al., 2019). Во время крупных извержений в нижнюю стратосферу выбрасываются огромные количества вулканического газа и пепла, большая часть выброшенного вулканического материала удаляется в течение нескольких дней или недель и мало влияет на изменение климата (Дивинский, Ивлев 2012). Наиболее значительные климатиче-

ские воздействия вулканических выбросов в стратосферу связаны с преобразованием диоксида серы в серную кислоту (Кондратьев и др., 2007; Зуев, Зуева 2011). Она быстро конденсируется в стратосфере с образованием шлейфов сульфатных аэрозолей, увеличивая аэрозольную оптическую толщину атмосферы (Мельников, Ушаков, 2008; Stenchikov et al., 2009; Marshall, et al., 2022). Сульфатные аэрозоли являются важным фактором воздействия на климат, поскольку аэрозоли изменяют как коротковолновую, так и длинноволновую радиацию в атмосфере, достигающую поверхности Земли (Gordeev, Girina, 2014; Toohey et al., 2019; von Savigny et al., 2020). Степень их воздействия на климат зависит от множества параметров, включая: объем выброса, высоту выброса и состав шлейфа, местоположение вулкана и др. (Robock, 2000; Foster et al., 2008; Wells et al., 2023). Самое сильное влияние на глобальную атмосферу обычно оказывают извержения вулканов, находящихся в тропической зоне, например, в Юго-Восточной Азии, Восточной Африке, в Латинской Америке. Они могут изменять погоду и влиять на климат в обоих полушариях Земли. Это происходит из-за особенностей циркуляции тропического воздуха, который может перемещаться на большие расстояния и вторгаться в более низкие и более высокие широты (Robock, 2000). В то же время, “внетропические” вулканы способны повлиять на погоду только в том полушарии, в котором они сами находятся.

Сильные вулканические извержения, такие, например, как крупное извержение вулкана Пинатубо в 1991 г., могут выбрасывать огромные объемы вулканического материала (в основном пепла и  $\text{SO}_2$ ) высоко в стратосферу, что приводит к временному охлаждению воздушной среды и поверхности (Кондратьев, 1993; Stenchikov, 2021). После крупного извержения Пинатубо наиболее значительными извержениями с точки зрения их воздействия на аэрозольную нагрузку стратосферы являются извержения вулканов: Сарычев в 2009 г. (Haywood et al., 2010; Rybin, 2011); Набро в 2011 г. (Sawamura, et al., 2012; Clarisse, 2014); Кальбуко в 2015 г. (Romero et al., 2016; Pardini et al., 2018) и Хунга Тонга-Хунга Хаапай в 2022 г. (Khaykin, 2022a; Bourassa et al., 2023; Lu et al., 2023).

На территории Курило-Камчатского региона расположено около 68 действующих и потенциально активных вулканов (Лаверов и др., 2005; Федотов, 2003; Озеров и др., 2020). Четыре вулкана находятся в состоянии почти непрерывных слабых или умеренных извержений, на фоне которых происходят пароксизмальные эксплозивные события (Гирина, Гордеев, 2007). Вулкан Ключевской активен на протяжении нескольких сотен лет; Шивелуч – с августа 1980 г.; Безымянный – с 22 октября 1955 г.;

Карымский – с 1 января 1996 г. Время от времени активизируются вулканы Авачинский, Мутновский, Горелый и др. В среднем, сильные эксплозивные извержения камчатских вулканов, при которых пеплы поднимаются на высоты 8–15 км над уровнем моря и выше, происходят примерно один раз в полтора года (Гирина, 2012).

Понимание сложных связей между вулканическими выбросами, атмосферными изменениями и их последствиями важно для предсказания этих процессов, а также расширения возможностей их моделирования.

В настоящей работе проведен анализ последствий эксплозивного извержения стратовулкана Райкоке, происходившего 22 июня 2019 г., которое считалось одним из сильных взрывных извержений в районе Курило-Камчатского региона, учитывая длительный покой (~100 лет) с момента его последнего крупного извержения, происходившего в 1924 г.

#### ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ И ОСОБЕННОСТИ МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

В процессе проведения исследований формировались и анализировались пространственно-временные распределения диоксида серы ( $\text{SO}_2$ ) от вулкана Райкоке в период его сильной активности в 2019 г., а также оценивалась общая масса выброшенного  $\text{SO}_2$  на высоте 15 км. Для этого использовались данные, полученные со спутника Sentinel-5P (аппаратура TROPOMI). Использование коллекции данных, получаемых с помощью аппаратуры TROPOMI, для анализа пространственно-временного распределения загрязняющих веществ (диоксида серы) в атмосфере во время извержения вулкана обеспечивало более высокое пространственное разрешение (~1.11 км) по сравнению с данными, получаемые с помощью предшествующих типов аппаратуры дистанционного зондирования Земли OMI (Aura) и SCIAMACHY (ENVISAT) (Theys et al., 2017). Это позволило более детально исследовать особенности вулканических облаков диоксида серы ( $\text{SO}_2$ ) при извержении вулкана Райкоке. Для исследований был использован тематический продукт, содержащий плотность вертикального столба диоксида серы ( $\text{SO}_2$ ) на высоте 15 км. Данные этого продукта извлекались с использованием облачной платформы Google Earth Engine (GEE), обеспечивающей применение метода дифференциальной оптической абсорбционной спектроскопии DOAS (Differential Optical Absorption Spectroscopy) (Platt and Stutz, 2008; Theys et al., 2017).

С целью получения более точных данных о плотности вертикального столба диоксида серы про-

водилась корректировка качества информации, извлекаемой из спутниковых данных. При этом выбирались данные, удовлетворяющие следующим критериям:

- доля снега и льда на регистрируемой поверхности была меньше 50% для устранения искажений из-за отражения солнечного света от снежного или ледяного покрова;

- значения диоксида серы в вертикальном столбе было больше  $0.001 \text{ моль/м}^2$  для исключения отрицательных значений, которые могут указывать на шум в данных;

- уровень достоверности данных выбирался выше 0.5;

- доля облачности была меньше 30% для исключения спутниковых данных, которые затрудняют регистрацию последствий извержения;

- значение зенитного угла Солнца ( $<60^\circ$ ) при регистрации данных, выбиралось с учетом необходимости снижения влияния атмосферных условий.

Для улучшения интерпретации получаемых результатов, единицы измерения плотности диоксида серы  $\text{моль/м}^2$  были переведены в единицы Добсона ( $1 \text{ DU} = 2.69 \times 10^{-6} \text{ моль/м}^2$ ).

При использовании спутниковых информационных продуктов для оценки общей массы  $\text{SO}_2$ , выбрасываемой при вулканических извержениях, могут существовать некоторые ограничения, связанные с особенностями этих процессов. На начальном этапе вулканических извержений существуют неопределенности, такие как высокая концентрация  $\text{SO}_2$ , которая приводит к эффектам насыщения спутниковых данных и, следовательно, к недооценке общей массы выбросов. Также на раннем этапе извержения может быть затруднено выявление массы  $\text{SO}_2$ , сопутствующее присутствию вулканического пепла (Yang et al., 2010). Повышение точности оценки общей массы  $\text{SO}_2$  после начального этапа вулканического извержения, может осложняться также процессом преобразования  $\text{SO}_2$  в сульфатный аэрозоль, который начинается сразу после вулканического выброса. Поэтому может недооцениваться также общая масса  $\text{SO}_2$ , рассчитанная по спутниковым данным на более позднем этапе извержения, когда шлейф рассеивается и пепел осаждается. Кроме того, на начальном этапе диоксида серы часто не выбрасывается вулканом за один раз, что еще больше усложняет оценку его общей массы (Cai, 2022).

Расчеты общей массы диоксида серы ( $\text{SO}_2$ ) на высоте 15 км, выброшенной в период активности вулкана Райкоке, и анализ его распространения производились по спутниковым данным с момента начала извержения 22 июня 2019 г. до 22 июля 2019 г.

Для предотвращения двойного учета значений общей массы диоксида серы, спутниковые данные, получаемые для различных пролетов, усреднялись в течение суточного интервала времени. Для более точной оценки концентраций  $\text{SO}_2$  учитывалось также влияние высоты прибора TROPOMI (altitude), поскольку давление и плотность газа изменяются с высотой. Далее вычислялась общая масса  $\text{SO}_2$  путем умножения значений, полученных из тематического продукта, содержащего плотность вертикального столба диоксида серы на молярную массу и на площадь каждого отдельного регистрируемого пикселя. Полученные результаты переводились в единицы измерения килотонны (кт).

Регистрация изменений аэрозольной оптической толщины и оценка её влияния на озоновый слой осуществлялись с учетом многолетних вариаций сформированных временных рядов спутниковых данных. При этом также принималась во внимание изменчивость температуры в верхней, средней и нижней частях стратосферы. Анализ изменчивости температуры в верхней, средней и нижней частях стратосферы проводился с использованием данных спутника Aqua (прибор AIRS) с пространственным разрешением  $1^\circ \times 1^\circ$ . Для анализа значения температур использовались данные, зарегистрированные в ночное время суток, на уровнях давления 150 гПа, 70 гПа и 20 гПа, которые соответствуют нижней, средней и верхней части стратосферного слоя.

Для анализа последствий вулканической активности были построены временные ряды тематического продукта OMAERUVd (Jethva and Torres, 2011), характеризующего изменения аэрозольной оптической толщины (Aerosol Optical Depth 500 nm). При этом использовались данные, получаемые со спутника Aura (прибор OMI) с пространственным разрешением  $1^\circ \times 1^\circ$ . Область проводимых исследований выбиралась с учетом дальности переноса вулканического облака  $\text{SO}_2$ .

Многолетние данные аэрозольной оптической толщины анализировались с применением методики, основанной на использовании интервала стандартного отклонения данных ( $\mu \pm \sigma$ ) от их среднеарифметических значений ( $\mu$ ) за период времени с 2005 по 2019 г. Аэрозольная оптическая толщина позволяет оценить количество аэрозолей от вулканической активности, которые могут влиять на состояние атмосферы и климат. Поскольку вулканические аэрозоли могут отражать и рассеивать солнечное излучение, то это имеет важное значение для изменений климата и должно учитываться в климатических моделях.

В настоящем исследовании анализировались также многолетние временные ряды глобального общего содержания озона в столбе атмосферы.

Для этого использовался тематический продукт OMDOAO3e, который основан на применении метода дифференциальной абсорбционной спектроскопии (DOAS) и использует значения яркости, регистрируемой прибором OMI в диапазоне спектра между 331.1 и 336.1 нм (Veefkind and Sneep, 2009). Данные тематического продукта OMDOAO3e регистрируются в стратосферном слое на высотах от 10 до 50 км с пространственным разрешением  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ . Они предоставляют информацию о вертикальном распределении озона и его концентрации в столбе атмосферы. Это является важным для изучения климатических изменений. Вариации общего содержания озона в столбе анализировались аналогично методике, примененной к временным рядам изменения аэрозольной оптической толщины, описанной выше.

В данном исследовании регистрация пеплового облака в процессе эксплозивного извержения стратовулкана Райкоке осуществлялась с использованием данных прибора MODIS (спутник Terra). При этом применялся тематический продукт MOD09GA, содержащий информацию об отражающей способности земной поверхности при отсутствии атмосферного рассеяния или поглощения (Vermote et al., 2015). Выбор этого тематического продукта был обусловлен тем, что он содержал данные с коррекцией влияния атмосферы.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ АНАЛИЗ

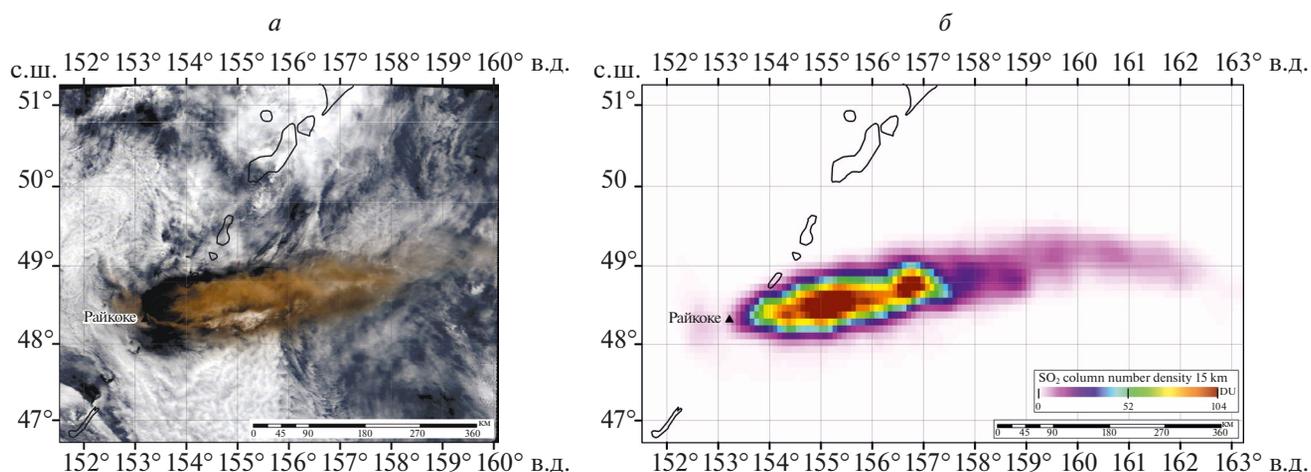
Сильное эксплозивное извержение стратовулкана Райкоке на Центральных Курилах началось 22 июня 2019 г. в 06:05 по местному времени. Эруптивная ко-

лонна поднималась на высоту 9.5–12.5 км над краем вулкана. Мощные пеплопады происходили на всей территории острова Райкоке (Рашидов и др. 2019). На рис. 1, а представлено изображение пеплового шлейфа от этого вулкана, полученное 22 июня 2019 г. со спутника Terra (аппаратура MODIS). Анализ рис. 1, а показал, что с помощью аппаратуры MODIS спутника Terra 22 июня 2019 г. был зарегистрирован пепловый шлейф от вулкана Райкоке, распространяющийся в восточном направлении более чем на 400 км (см. рис. 1, а). В последующие дни после извержения, шлейф пепла быстро рассеивался и осаждался, и его невозможно было отслеживать дальше по данным аппаратуры MODIS (спутник Terra).

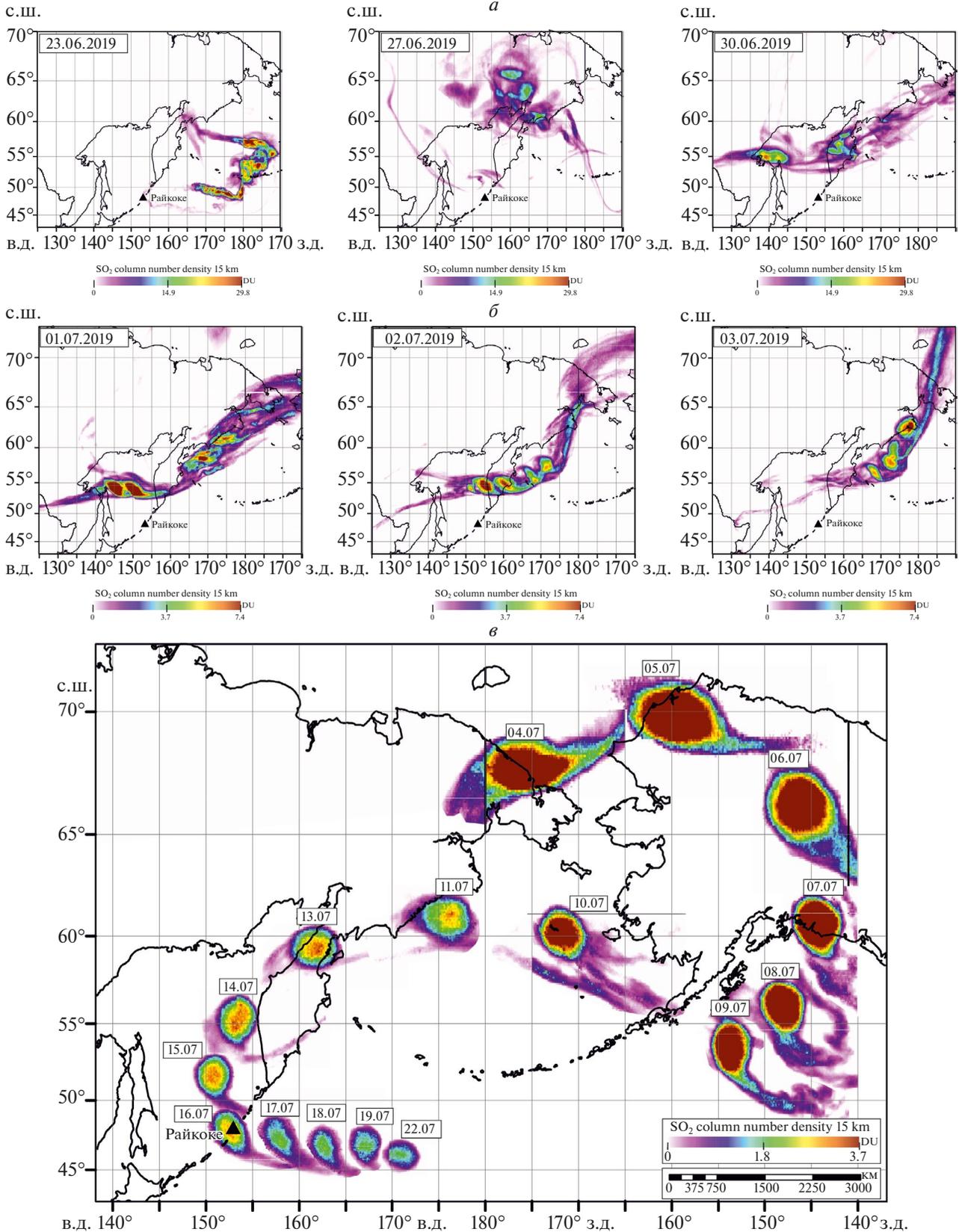
На рис 1, б приведено распределение плотности вертикального столба диоксида серы ( $\text{SO}_2$ ) на высоте 15 км, полученное по данным спутника Sentinel-5P (аппаратура TROPOMI) с использованием метода DOAS. По данным спутника Sentinel-5P (аппаратура TROPOMI) шлейф диоксида серы  $\text{SO}_2$  распространился на расстояние около 770 км (см. рис. 1, б) и продолжил перемещаться.

На рис. 2 приведены вертикальные плотности столба диоксида серы ( $\text{SO}_2$ ) на высоте 15 км, данные получены с помощью аппаратуры TROPOMI (спутник Sentinel-5P) с использованием метода DOAS в различные периоды времени.

Анализ рис. 2 показал следующее. К 23 июня 2019 г. (рис. 2, а) протяжённость вулканического облака  $\text{SO}_2$  составляла более 2500 км (см. рис. 2, а), но содержание  $\text{SO}_2$  в столбе снизилось (по сравнению с 22 июня 2019 г. (см. рис. 1б) до величины 29.8 DU. Вулканический шлейф  $\text{SO}_2$  перемещался в сторону Чукотки и 30 июня 2019 г. начал разделяться на две части, одна из которых была зафик-



**Рис. 1.** Извержение вулкана Райкоке 22.06.2019 г.: а – изображение пеплового шлейфа от вулкана, полученное со спутника Terra (аппаратура MODIS); б – плотность вертикального столба диоксида серы ( $\text{SO}_2$ ) на высоте 15 км, получены по данным спутника Sentinel-5P (аппаратура TROPOMI) с использованием метода DOAS.



**Рис. 2.** Вертикальная плотность столба диоксида серы (SO<sub>2</sub>) на высоте 15 км, данные получены с помощью аппаратуры TROPOMI (спутник Sentinel-5P) с использованием метода DOAS. Перемещение вулканического облака SO<sub>2</sub>: а – 23, 27 и 30 июня 2019 г.; б – с 1 по 3 июля 2019 г.; в – с 4 по 22 июля 2019 г.

сирована над Сахалинской областью, а другая над центральной частью Камчатского полуострова (см. правую часть рис. 2, а).

С 1 по 3 июля 2019 г. шлейф  $\text{SO}_2$  начал группироваться в отдельные изолированные структуры, хорошо различимые по данным спутника Sentinel-5P (аппаратура TROPOMI) (см. рис. 2, б). Содержание  $\text{SO}_2$  в столбе доходило до 7.4 DU. В последующие дни с 4 по 22 июля 2019 г. плотность облака  $\text{SO}_2$  уменьшалась (см. рис. 2, в), поскольку шлейф рассеивался и часть  $\text{SO}_2$  преобразовывалась в сульфатные аэрозоли.

Из анализа рис. 2, в следует, что после 3 июля 2019 г. шлейф  $\text{SO}_2$  начал закручиваться циклоном, господствовавшим в районе Командорских островов в северной части Тихого океана. В июле 2019 г. циклоны чаще всего смещались через Чукотку в арктические моря и на север Канады, о чем свидетельствуют данные Гидрометцентра России (<https://meteoinfo.ru>). Как следствие, шлейф  $\text{SO}_2$  распространяющийся от вулкана Райкоке превращался в ряд плотных ограниченных пятен, хорошо обнаруживавшихся со спутника Sentinel-5P (TROPOMI), которые достигли территории Аляски (см. рис. 2, в).

Из анализа рис. 2, в следует также, что с 4 по 9 июля 2019 г. шлейф  $\text{SO}_2$  сделал разворот над Аляской, пересек Северную часть Тихого океана (до 13 июля 2019 г.) и 16 июля 2019 г. вернулся в район Курило-Камчатского региона к месту своего зарождения. Далее вулканическое облако  $\text{SO}_2$  перемещалось вдоль восточного фланга Азиатского летнего муссонного антициклона, прежде чем войти в субтропическую струю, которая за 10 дней перенесла эту структуру через всю Евразию и Северную Африку (Khaykin et al., 2022b).

Диоксид серы, выброшенный в период сильной вулканической активности, окисляясь до серной

кислоты, способствовал образованию аэрозолей, которые могут поглощать солнечное излучение и, как следствие, изменять динамику атмосферных процессов, влияя тем самым и на содержание озона. Концентрация озона может варьироваться в зависимости от времени года, географического положения и метеорологических условий (от 200 DU до 300 DU в нормальных условиях).

На рис. 3 представлены результаты расчетов общей массы выбросов диоксида серы  $\text{SO}_2$ , распространяющейся от вулкана Райкоке в 2019 г. с момента начала извержения (22 июня 2019 г.) до 22 июля 2019 г. Перемещение вулканического облака  $\text{SO}_2$  представлено на рис. 2.

Анализ рис. 3 показывает, что в день извержения вулкана Райкоке (22 июня 2019 г.) была зафиксирована общая масса диоксида серы, равная приблизительно  $\sim 1.58$  Тг. Эти данные сопоставимы с результатами полученными в работах (Muser et al., 2020; Kloss et al., 2021; De Leeuw et al., 2021; Khaykin et al., 2022b), которые составляли величины от 1.4 Тг до 2.1 Тг.

Далее в течение нескольких дней (с 23 июня по 2 июля 2019 г. включительно) сохранялись повышенные значения общей массы диоксида серы. Это объясняется тем, что выбросы от вулкана Райкоке имели высокое содержание  $\text{SO}_2$  (рис. 2 а, б) и большие площади распространения. А затем общая масса диоксида серы ( $\text{SO}_2$ ) экспоненциально снижалась со временем (см. рис. 3). Количество стратосферного  $\text{SO}_2$  уменьшалось в связи с фотохимическим преобразованием в серную кислоту, из-за реакции с гидроксильным радикалом ОН. Серная кислота, образуя новые частицы и конденсируясь на уже существующих частицах, образовывала долгоживущий стратосферный сульфатный аэрозоль (Gorkavji et al., 2021).

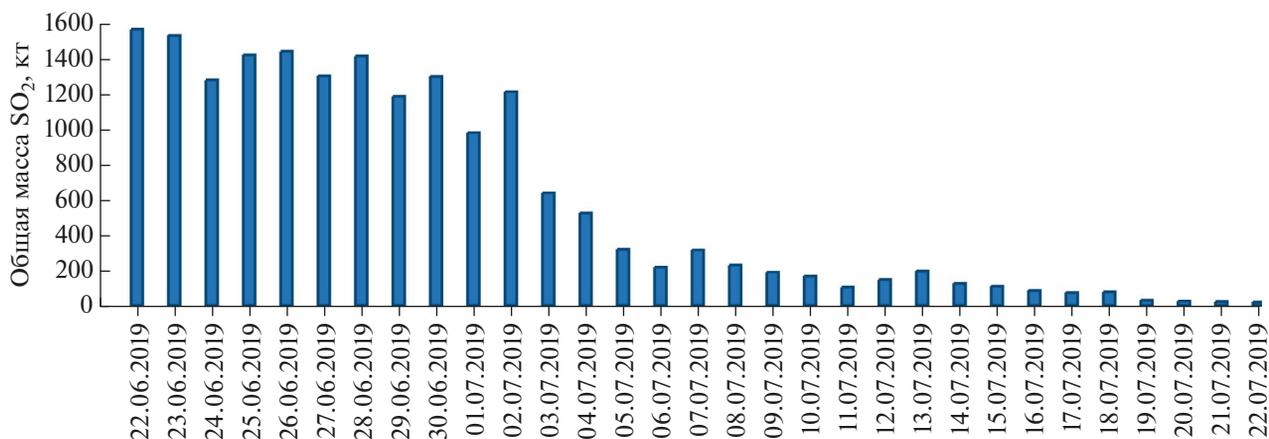
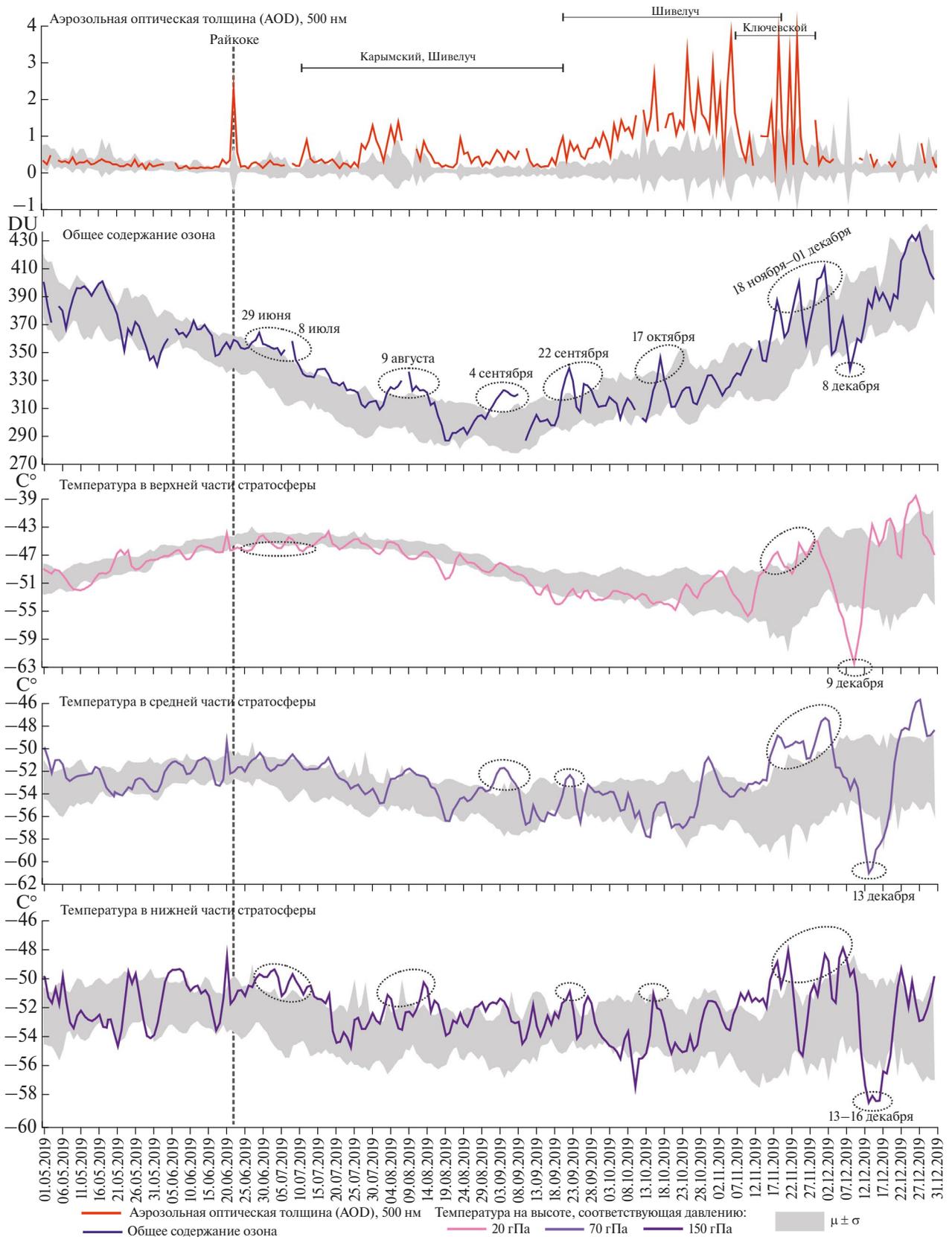


Рис. 3. Общая масса выбросов диоксида серы ( $\text{SO}_2$ ) распространившихся от вулкана Райкоке, кт (килотонны).



**Рис. 4.** Изменения параметров атмосферы в период сильной вулканической активности в 2019 г.: аэрозольной оптической толщины и содержания озона в столбе атмосферы по данным спутника Aura (прибор OMI), а также температуры в верхней, средней, нижней частях стратосферы по данным спутника Aqua (прибор AIRS).

На рис. 4 представлены результаты анализа многолетних временных рядов аэрозольной оптической толщины и содержания озона в столбе атмосферы по данным спутника Ауга (прибор OMI), а также изменения температур на высотах, соответствующих давлению 20 гПа, 70 гПа и 150 гПа, в верхней, средней, нижней частях стратосферы соответственно по данным спутника Ауга (прибор AIRS).

Всплеск значений в общей аэрозольной оптической плотности (AOD), выявленный 22 июня 2019 г., указывал на начало активности вулкана Райкоке (см. рис. 4), после которого 29 июня и 8 июля 2019 г. были выявлены превышения (на ~10 DU) содержания озона в столбе атмосферы относительно значений для прошлых лет (2005–2018 гг.), обозначенных серым цветом.

Анализ рис. 4 (верхняя панель) показывает, что после сильного извержения вулкана Райкоке значения общей аэрозольной оптической плотности AOD превышали показатели многолетних данных с 2005 по 2018 гг. (обозначено серым цветом) в исследуемом регионе. В повышение значений общей аэрозольной оптической плотности AOD вносили свой вклад в том числе и активные вулканы Центральной части Камчатского полуострова. С середины июля до конца сентября 2019 г. вулканы Карымский и Шивелуч проявляли свою активность в виде небольших экструзивно-эксплозивных выбросов пепла и газа (Гирина и др., 2020). В этот период времени были обнаружены превышения общей аэрозольной оптической плотности AOD, которые вероятно послужили увеличению содержания озона в столбе атмосферы (9 августа, 4 сентября и 22 сентября 2019 г.), относительно прошлых лет 2005–2018 гг. на величину ~14–16 DU. Процессы влияния стратосферных аэрозолей на радиационный баланс Земли и нагрузку на озоновый слой подтверждаются в работах ряда авторов, например, (Rasch et al., 2008; Thompson and Solomon, 2009).

Повышенная аэрозольная нагрузка в период с конца августа до окончания ноября 2019 г. объясняется значительной вулканической активностью, происходящей в исследуемом регионе. Вулкан Шивелуч в дни 29 августа, 2 и 6 октября, 3 и 11 ноября 2019 г. проявлял сильную активность с наблюдаемыми эксплозивными событиями, сопровождавшимися подъемом пепла до высоты 12 км над уровнем моря (Гирина и др., 2020). Активность вулкана Шивелуч с конца сентября по начало октября (рис. 4) послужила повышению общей аэрозольной оптической плотности (AOD) до 3.5, которая способствовала увеличению содержания озона в столбе атмосферы 17 октября 2019 г. (до 343 DU). Также наблюдались эксплозивные события стромболианского типа умеренной силы, обусловленные активностью вулкана Ключевской, проявлявшейся с на-

чала ноября 2019 г. Повышение общей аэрозольной оптической плотности AOD (до 4) в это время способствовало увеличению содержания озона в столбе атмосферы (до 410 DU) и превышению над многолетними данными (с 2005–2018 гг.) в среднем на 20 DU. В последствии 8 декабря 2019 г. были выявлены резкие изменения содержания озона в столбе атмосферы, в виде его резкого снижения до уровня 337 DU.

Анализ рис. 4 показывает, что изменения общего содержания озона в столбе атмосферы согласуются с вариациями температур в стратосфере. Превышения содержания озона, выявленные после извержения вулкана Райкоке, сопутствовали повышению температуры в нижней части стратосферы на 2–3°C по сравнению с многолетними изменениями (с 2005–2018 гг.). А в верхней части стратосферы температура снизилась на 1–2°C в сравнении с прошлыми годами. Значительное увеличение содержания озона, происшедшее с 18 ноября по 1 декабря 2019 г., привело также и к росту температур во всех частях стратосферы на 1–3°C (см. рис. 4). Снижение содержания озона, происшедшее с 8 декабря 2019 г., после окончания вулканической активности, сопровождалось также резким понижением температур (на 17°C) в верхней части стратосферы уже на следующий день, 9 декабря 2019 г., а затем 13 декабря 2019 г. было зафиксировано снижение температуры в средней части стратосферы на 8°C. Затем в период времени с 13 по 16 декабря 2019 г. было выявлено понижение температуры на 9°C и в нижней части стратосферы (см. рис. 4 нижняя панель).

Полученные результаты показали, что временная изменчивость содержания озона после извержений вулканов согласуется с изменениями температур в стратосфере. Это подтверждается также результатами, приведенными в работе (Thompson and Solomon, 2009).

Характеристика стратосферных аэрозолей важна не только для понимания изменений температуры и содержания озона в атмосфере. В последние годы данные об атмосферном аэрозоле приобрели актуальность из-за их потенциального использования в качестве геоинженерного инструмента для уменьшения последствий глобального потепления (Семенов и др., 2008; Rasch et al., 2008; Chouza, 2020).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе с использованием различных спутниковых данных проанализированы последствия сильного эксплозивного извержения стратосферного вулкана Райкоке, происшедшего в 2019 г. Вулкан расположен на территории Центральных Курил.

По данным спутника Terra (аппаратура MODIS) был обнаружен пепловый шлейф, вызванный извержением этого вулкана, которое началось 22 июня 2019 г. В этот день шлейф распространялся в восточном направлении на расстояние более чем на 400 км. Использование данных спутника Sentinel-5P (аппаратура TROPOMI) более высокого пространственного разрешения, по сравнению с ранее используемыми данными, позволило проследить пространственно-временное перемещение вулканического облака и выявить изменения в плотности содержания диоксида серы ( $\text{SO}_2$ ) на высоте 15 км. Динамическая ситуация вокруг шлейфа диоксида серы, связанная с присутствием циклона, сформировала в процессе переноса и рассеивания выбросов диоксида серы уникальные черты компактных облаков этой примеси с ограниченными размерами и различными формами. В процессе исследований удалось зафиксировать вулканический шлейф, который распространился по Северному полушарию и непрерывно наблюдался в течение нескольких месяцев после начала извержения стратовулкана Райкоке.

С помощью спутниковых данных, полученных с использованием облачной платформы Google Earth Engine и системы обработки, созданной на языке программирования JavaScript, были произведены расчеты общей массы диоксида серы ( $\text{SO}_2$ ) на высоте 15 км, выброшенной в период сильной активности вулкана Райкоке с 22 июня и прослеживалось распространение шлейфа этой примеси до 22 июля 2019 г. Установлено, что со временем максимальное количество  $\text{SO}_2$  в столбе шлейфа постепенно уменьшалось за счет фотохимических процессов, которые преобразовывали  $\text{SO}_2$  в серную кислоту  $\text{H}_2\text{SO}_4$  и преобразовывалась в стратосфере в шлейфы сульфатных аэрозолей.

Точное описание стратосферных вулканических извержений является сложной задачей. Поэтому в настоящем исследовании учитывались некоторые ограничения в качестве исходных спутниковых данных, а также в результатах их обработки. Противоречивость информации о последовательности выбросов вулканических материалов также может привести к разным выводам об одном и том же вулканическом извержении.

Преобразование стратосферного  $\text{SO}_2$  в серную кислоту, а затем в долгоживущие сульфатные аэрозоли позволило обнаружить пиковые превышения аэрозольной оптической толщины (AOD), которые указывали на начало активности вулкана Райкоке. Сделано предположение о том, что выявленные превышения AOD, привели к увеличению содержания озона в столбе атмосферы через 7–17 дней после начала сильного извержения исследуемого вулкана.

Показано, что значительная активность вулканов Карымский, Шивелуч и Ключевской, происходившая в Курило-Камчатском регионе с конца августа до окончания ноября 2019 г., привела к увеличению значений аэрозольной оптической толщины (AOD до величины, равной 4). Выявленная повышенная аэрозольная нагрузка в этот период времени, вероятно, содействовала увеличению содержания озона в столбе атмосферы (до 410 DU). Резкое снижение содержания озона в столбе атмосферы (на 73 DU) было обнаружено после окончания сильной вулканической активности Курило-Камчатского региона.

Проведенный анализ вариаций температур в стратосфере (в нижней, средней и верхней) позволил выявить взаимосвязь изменений общего содержания озона в столбе атмосферы, которые согласовывались с динамикой температур в стратосфере в период после вулканической активности.

Выполненный анализ последствий сильной активности вулкана Райкоке продемонстрировал изменчивость выбросов  $\text{SO}_2$  от вулканов и выявил потребность в проведении непрерывных измерений, а также необходимость сравнений различных спутниковых и наземных данных, полученных за более длительные промежутки времени.

Дальнейшие исследования целесообразно повестить проверке и улучшению представления о механизмах формирования и развития вулканических шлейфов для использования их в глобальных и региональных климатических моделях. Это приведет к лучшему пониманию охлаждающих эффектов, связанных с вулканической активностью. Взаимодополняемость результатов наблюдений и моделирования также даст возможность оценить неопределенности, связанные с предлагаемыми стратегиями воздействия на климат с использованием стратосферного аэрозоля, которые предлагаются в качестве метода смягчения негативных последствий изменения климата.

Использование результатов данных исследований будет полезно для получения новых представлений о недавних изменениях климата, вызванных сильной вулканической активностью.

## ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследование выполнено в НИИ “АЭРОКОСМОС” в рамках проекта №124021200003-1.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Гирин О.А. О предвестнике извержений вулканов Камчатки, основанном на данных спутникового мониторинга // Вулканология и сейсмология, 2012, № 3, с. 14–22.

- Гирина О.А., Гордеев Е.И. Проект KVERT – снижение вулканической опасности для авиации при эксплозивных извержениях вулканов Камчатки и Северных Курил // Вестник ДВО РАН. 2007. № 2 (132). С. 100–109.
- Гирина О.А., Маневич А.Г., Мельников Д.В., Нурдаев А.А., Лупян Е.А. Активность вулканов Камчатки и Курильских островов в 2019 г. и их опасность для авиации // Вулканизм и связанные с ним процессы. Материалы XXIII ежегодной научной конференции, посвящённой Дню вулканолога, 2020 г. – Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2020. Р. 11–14.
- Дивинский Л.И., Ивлев Л.С. О воде и аэрозолях вулканического происхождения в высоких слоях атмосферы // Природная Среда. 2012. № 4 (25), С. 254–261.
- Зуев В.В., Зуева Н.Е. Вулканогенные возмущения стратосферы – главный регулятор долговременного поведения озоносферы в период с 1979 по 2008 г. // Оптика атмосферы и океана. 2011. Т. 24. № 01. С. 30–34.
- Ивлев Л.С., Колосов А.С., Терёхин С.Н. Эруптивные вулканические процессы: механизмы и характеристики // Вестник Санкт-Петербургского университета. 2008. Сер. 4. Вып. 2. С. 35–48.
- Кондратьев К.Я. Комплексный мониторинг последствий извержения вулкана Пинатубо // Исследования Земли из космоса. 1993. № 1. С. 111–122.
- Кондратьев К.Я., Ивлев Л.С., Крапивин В.Ф. Свойства, процессы образования и последствия воздействий атмосферного аэрозоля: от нано – до глобальных масштабов. – СПб.: ВВМ, 2007. – 858 с.
- Лаверов Н.П., Добрецов Н.Л., Богатиков О.А., Бондур В.Г., Гурбанов А.Г., Карамурзов Б.С., Коваленко В.И., Мелекесцев И.В., Нечаев Ю.В., Пономарева В.В., Рогожин Е.А., Собисевич А.Л., Собисевич Л.Е., Федотов С.А., Хренов А.П., Ярмолюк В.В. Новейший и современный вулканизм на территории России. М: Наука, 2005. 608 с.
- Маневич А.Г., Гирина О.А., Мельников Д.В., Бриль А.А., Романова И.М., Сорокин А.А., Крамарева Л.С., Королев С.П. Извержения вулкана Ключевской в 2023–2024 гг. по данным дистанционного мониторинга в информационной системе VolSatView // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2024. Т. 21. № 3. С. 94–103. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2024-21-3-94-103>
- Мельников Д.В., Ушаков С.В. Мониторинг атмосферного содержания SO<sub>2</sub> при крупных извержениях вулканов Камчатки за 2007 г. посредством спутниковых методов исследований // Геофизический мониторинг и проблемы сейсмической безопасности Дальнего Востока России : тр. регион. науч.-техн. конф. 11–17 нояб. 2007 г., Петропавловск-Камч. / РАН ; Геофиз. служба, Камч. фил. – Петропавловск-Камч., 2008. – Т. 1. – С. 101–104. <http://www.emsd.ru/konf071112/pdf/t1/str101.pdf>
- Озеров А.Ю., Гирина О.А., Жаринов Н.А., Белоусов А.Б., Демянчук Ю.В. Извержения вулканов Северной группы Камчатки в начале XXI века // Вулканология и Сейсмология. 2020. №1. стр. 3–19. <https://doi.org/10.31857/S0203030620010058>
- Рашидов В.А., Гирина О.А., Озеров А.Ю., Павлов Н.Н. Извержение вулкана Райкоке (Курильские острова) в июне 2019 г. // Вестник КРАУНЦ. Серия: Науки о Земле. 2019 Вып. 42. № 2. С. 5–8. <https://doi.org/10.31431/1816-5524-2019-2-42-5-8>
- Семенов С.М., Израэль Ю.А., Груза Г.В., Ранькова Э.Я. Изменения глобальной температуры и региональные риски при некоторых стабилизационных сценариях антропогенной эмиссии диоксида углерода и метана. В кн.: Изменение окружающей среды и климата: природные и связанные с ними техногенные катастрофы. Т. 6: изменения климата: влияние земных и внеземных факторов / Отв. ред. Г.С. Голицын. М.: ИФА РАН, ИФЗ РАН, 2008, с. 24–36.
- Федотов С.А. Вулканизм и сейсмичность, наука, общество, события и жизнь (статьи, беседы и выступления 1952–2002 гг.). Петропавловск-Камчатский: Холдинговая компания “Новая Книга”, 2003. 184 с. ил.96. ISBN5-87750-101-1
- Федотов С.А. Магматические питающие системы и механизм извержений вулканов. – М.: Наука, 2006. – 455 с
- Bourassa A.E., Zawada D.J., Rieger L.A., Warnock T.W., Toohey M., Degenstein D.A. Tomographic retrievals of Hunga Tonga-Hunga Ha’apai volcanic aerosol // Geophysical Research Letters, 2023. 50, e2022GL101978. <https://doi.org/10.1029/2022GL101978>
- Cai Z., Griessbach S., Hoffmann L. Improved estimation of volcanic SO<sub>2</sub> injections from satellite retrievals and Lagrangian transport simulations: the 2019 Raikoke eruption // Atmos. Chem. Phys., 2022. 22, 6787–6809, <https://doi.org/10.5194/acp-22-6787-2022>
- Chouza F., Leblanc T., Barnes, J., Brewer M., Wang, P., Koon D. Long-term (1999–2019) variability of stratospheric aerosol over Mauna Loa, Hawaii, as seen by two co-located lidars and satellite measurements, // Atmos. Chem. Phys., 2020. 20, 6821–6839, <https://doi.org/10.5194/acp-20-6821-2020>
- Clarisse, L., Coheur P.-F., Theys N., Hurtmans D., Clerbaux C. The 2011 Nabro eruption, a SO<sub>2</sub> plume height analysis using IASI measurements // Atmos. Chem. Phys., 2014. 14, 3095–3111, <https://doi.org/10.5194/acp-14-3095-2014>.
- de Leeuw J., Schmidt A., Witham C. S., Theys N., Taylor I.A., Grainger R.G., Pope R.J., Haywood J., Osborne M., Kristiansen N.I. The 2019 Raikoke volcanic eruption – Part 1: Dispersion model simulations and satellite retrievals of volcanic sulfur dioxide // Atmos. Chem. Phys., 2021. 21, 10851–10879, <https://doi.org/10.5194/acp-21-10851-2021>,
- Fisher B.L., Krotkov N.A., Bhartia P.K., Li C., Carn S.A., Hughes E., Leonard P.J.T. A new discrete wavelength backscattered ultraviolet algorithm for consistent volcanic SO<sub>2</sub> retrievals from multiple satellite missions // Atmos. Meas. Tech., 2019. 12, 5137–5153, <https://doi.org/10.5194/amt-12-5137-2019>
- Forster P., Ramaswamy V., Artaxo P., Bernsten T., Betts R., Fahey D., Haywood J., Lean J., Lowe D., Myhre G., Nganga J., Prinn R., Raga G., Schulz M., Dorland, R.V. Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing, in: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, edited by: Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K., Tignor, M., and Miller, H., 129–234, Cambridge University Press, United Kingdom and New York, NY, USA, 2008.
- Gordeev E.I., Girina, O.A. Volcanoes and the threat they pose for aircraft // Vestnik Rossiiskoi Akademii Nauk, 2014, vol. 84, no. 2, pp. 134–142. <https://doi.org/10.7868/S0869587314020121>
- Gorkavyy N., Krotkov N., Li C., Lait L., Colarco P., Carn S., DeLand M., Newman P., Schoeberl M., Taha G., Torres O., Vasilkov A., Joiner J. Tracking aerosols and SO<sub>2</sub> clouds from the Raikoke eruption: 3D view from satellite observations // Atmos. Meas. Tech., 2021. 14, 7545–7563, <https://doi.org/10.5194/amt-14-7545-2021>
- Guffanti M., Casadevall T.J. Budding K. Encounters of aircraft with volcanic ash clouds: a compilation of known incidents, 1953–2009 // U.S. Geological Survey Data Series 545, 2010. ver. 1.0, 12 p., plus 4 appendixes including the compilation database.

- Haywood J. M., et al. Observations of the eruption of the Sarychev volcano and simulations using the HadGEM2 climate model // J. Geophys. Res., 2010. 115, D21212, <https://doi.org/10.1029/2010JD014447>
- Jethva H., Torres O. Satellite-based evidence of wavelength-dependent aerosol absorption in biomass burning smoke inferred from Ozone Monitoring Instrument // Atmos. Chem. Phys., 2011. 11, 10541–10551, <https://doi.org/10.5194/acp-11-10541-2011>
- Khaykin S. et al. Global perturbation of stratospheric water and aerosol burden by Hunga eruption // Commun. Earth Environ. 2022a. 3, 316. <https://doi.org/10.1038/s43247-022-00652-x>
- Khaykin S.M., de Laat A.T.J., Godin-Beekmann S. et al. Unexpected self-lofting and dynamical confinement of volcanic plumes: the Raikoke 2019 case // Sci Rep. 2022b. 12, 22409 <https://doi.org/10.1038/s41598-022-27021-0>
- Kloss C., Berthet G., Sellitto P., Ploeger F., Taha G., Tidiga M., Eremenko M., Bossolasco A., Jégou F., Renard J.-B., Legras B. Stratospheric aerosol layer perturbation caused by the 2019 Raikoke and Ulawun eruptions and their radiative forcing // Atmos. Chem. Phys., 2021. 21, 535–560, <https://doi.org/10.5194/acp-21-535-2021>
- Krotkov N. A., et al. Validation of SO<sub>2</sub> retrievals from the Ozone Monitoring Instrument over NE China // J. Geophys. Res., 2008. 113, D16S40, <https://doi.org/10.1029/2007JD008818>
- Lu J., Lou S., Huang X., Xue L., Ding K., Liu T., et al. Stratospheric aerosol and ozone responses to the Hunga Tonga-Hunga Ha'apai volcanic eruption // Geophysical Research Letters, 2023. 50, e2022GL102315. <https://doi.org/10.1029/2022GL102315>
- Marshall L.R., Maters E.C., Schmidt A. et al. Volcanic effects on climate: recent advances and future avenues // Bull. Volcanol. 2022. 84, 54. <https://doi.org/10.1007/s00445-022-01559-3>
- Muser L. O. et al. Particle aging and aerosol–radiation interaction affect volcanic plume dispersion: Evidence from the Raikoke 2019 eruption // Atmos. Chem. Phys. 20, 2020. 15015–15036. <https://doi.org/10.5194/acp-20-15015-2020>
- Pardini F., Burton M., Arzilli F., La Spina G., Polacci M. SO<sub>2</sub> emissions, plume heights and magmatic processes inferred from satellite data: The 2015 Calbuco eruptions // Journal of Volcanology and Geothermal Research, 2018. 361, 12–24. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2018.08.001>
- Platt U., Stutz J. Differential optical absorption spectroscopy – Springer–Verlag, New–York, Berlin, Heidelberg, 2008. – 593 p.
- Rasch P.J., Tilmes S., Turco R.P., Robock A., Oman L., Chen C.-C., Stenchikov G.L., Garcia R.R. An overview of geoengineering of climate using stratospheric sulphate aerosols, Philos. T. Roy. Soc. A, 2008. 366, 4007–4037, <https://doi.org/10.1098/rsta.2008.0131>
- Reed B.E., Peters D.M., McPheat R., Grainger R.G. The Complex Refractive Index of Volcanic Ash Aerosol Retrieved from Spectral Mass Extinction // J. Geophys. Res. Atmos. 2018, 123, pp. 1339–1350, <https://doi.org/10.1002/2017JD027362>
- Robock A. Volcanic eruptions and climate // Rev. Geophys., 2000. 38, 191–219, <https://doi.org/10.1029/1998RG000054>
- Romero J.E., Morgavi D., Arzilli F., Daga R., Caselli A., Reckziegel F., Perugini D. Eruption dynamics of the 22–23 April 2015 Calbuco Volcano (Southern Chile): Analyses of tephra fall deposits // Journal of Volcanology and Geothermal Research, 2016. 317, 15–29. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2016.02.027>
- Rybin A., Chibisova M., Webley P., Steensen T., Izbekov P., Neal C., Realmuto V. Satellite and ground observations of the June 2009 eruption of Sarychev Peak volcano, Matua Island, Central Kuriles // Bull. Volcanol., 2011. 73(9), 1377–1392, <https://doi.org/10.1007/s00445-011-0481-0>
- Sato M., Hansen J.E., McCormick M.P., Pollack J.B. Stratospheric aerosol optical depths, 1850–1990 // J. Geophys. Res. 1993. 98, 22987. <https://doi.org/10.1029/93JD02553>
- Sawamura P., et al. Stratospheric AOD after the 2011 eruption of Nabro volcano measured by lidars over the Northern Hemisphere, Environ. Res. Lett., 2012. 7(3), 034,013, <https://doi.org/10.1088/1748-9326/7/3/034013>
- Stenchikov G., Delworth T.L., Ramaswamy V., Stouffer R.J., Wittenberg A., Zeng F. Volcanic signals in oceans // J. Geophys. Res., 2009. 114, D16104, <https://doi.org/10.1029/2008JD011673>
- Stenchikov G., Ukhov A., Osipov S., Ahmadov R., Grell G., Cady-Pereira K., Mlawer E., Iacono M. How Does a Pinatubo-Size Volcanic Cloud Reach the Middle Stratosphere? // J. Geophys. Res.—Atmos., 2021. 126, e2020JD033829, <https://doi.org/10.1029/2020JD033829>
- Theys N., De Smedt I., Yu H., Danckaert T., van Gent J., Hörmann C., Wagner T., Hedelt P., Bauer H., Romahn F., Pedernana M., Loyola D., Van Roozendaal M. Sulfur dioxide retrievals from TROPOMI onboard Sentinel-5 Precursor: algorithm theoretical basis // Atmos. Meas. Tech., 2017. 10, 119–153, <https://doi.org/10.5194/amt-10-119-2017>
- Thompson D.W. Solomon S. Understanding recent stratospheric climate change, J. Climate, 2009. 22, 1934–1943, <https://doi.org/10.1175/2008JCLI2482.1>
- Thordarson Th., Self S. Atmospheric and environmental effects of the 1783 – 1784 Laki eruption: A review and reassessment // J. Geophys. Res., 2003. 108(D1), 4011, <https://doi.org/10.1029/2001JD002042>
- Toohey M., Krüger K., Schmidt H., Timmreck C., Sigl M., Stoffel M., Wilson R. Disproportionately strong climate forcing from extratropical explosive volcanic eruptions // Nat. Geosci., 2019. 12, 100–107, <https://doi.org/10.1038/s41561-018-0286-2>
- Veeffkind P., Sneep M. OMD0A03 README FILE: [http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/Aura/data-holdings/OMI/documents/v003/OMD0A03\\_README\\_V003.shtml](http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/Aura/data-holdings/OMI/documents/v003/OMD0A03_README_V003.shtml) (last access: 14 January 2012), 2009.
- Vermote E.F., Roger J.C., Ray J.P. MODIS Surface Reflectance User's Guide Collection 6. [Accessed 23 June 2016]; 2015 May; [http://modis-sr.ltdri.org/guide/MOD09\\_UserGuide\\_v1.4.pdf](http://modis-sr.ltdri.org/guide/MOD09_UserGuide_v1.4.pdf)
- von Savigny C., Timmreck C., Buehler S.A., Burrows J.P., Giorgetta M., Hegerl G., Horvath A., Hoshyaripour G. A., Hoose C., Quaas J., Malinina E., Rozanov A., Schmidt H., Thomason L., Toohey M., Vogel B.: The Research Unit VolImpact: Revisiting the volcanic impact on atmosphere and climate – preparations for the next big volcanic eruption // Meteorol. Z., 2020. 29, 3–18, <https://doi.org/10.1127/metz/2019/0999>
- Watson E.J., Swindles G.T., Stevenson J.A., Savov I., Lawson I.T. The transport of Icelandic volcanic ash: Insights from northern European cryptotephra records // Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2016. 121, 7177–7192. <https://doi.org/10.1002/2016JB013350>
- Wells A.F., Jones A., Osborne M., Damany-Pearce L., Partridge D.G., Haywood J.M.: Including ash in UKESM1 model simulations of the Raikoke volcanic eruption reveals improved agreement with observations // Atmos. Chem. Phys., 2023, 3985–4007, <https://doi.org/10.5194/acp-23-3985-2023>
- Yang K., Liu X., Bhartia P.K., Krotkov N.A., Carn S.A., Hughes E.J., Krueger A.J., Spurr R.J.D., Trahan S.G. Direct retrieval of sulfur dioxide amount and altitude from spaceborne hyperspectral UV measurements: Theory and application // J. Geophys. Res., 2010. 115, D00L09, <https://doi.org/10.1029/2010JD013982>

# Studying Aftermath of the Strong 2019 Raikoke Volcano Eruption in Central Kuril Islands Using Satellite Data

V. G. Bondur<sup>1</sup>, O. S. Voronova<sup>1</sup>

<sup>1</sup>AEROCOSMOS Research Institute for Aerospace Monitoring, Moscow, Russia

Spatiotemporal distribution of sulfur dioxide content during the strong 2019 Raikoke stratovolcano eruption was studied using satellite data. The total mass of SO<sub>2</sub> emitted at an altitude of 15 km was determined. The influence of stratospheric aerosols on the Earth's ozone layer was assessed, and changes in ozone content in the atmospheric column were detected based on the analysis of multiannual time series of aerosol optical depth change. The values of aerosol optical depth increased (up to 2.3), which was related to the active transformation of sulfur dioxide into the sulfuric acid and the generation of sulfate aerosols. A sharp decrease in ozone content (by 73 DU) was detected after the end of volcanic activity, which was followed by a significant decrease in temperatures in the stratosphere (by 8–17°C). It was found that increased values of the extracted mass of SO<sub>2</sub> persisted for several days after the eruption and then decreased exponentially with time. Changes in the total ozone content in the atmospheric column were consistent with variations in temperatures in the stratosphere.

*Keywords:* remote sensing, satellite data, natural disasters, volcanoes, sulfur dioxide, aerosol optical depth

## REFERENCES

- Bourassa A.E., Zawada D.J., Rieger L.A., Warnock T.W., Toohey M., Degenstein D.A.* Tomographic retrievals of Hunga Tonga-Hunga Ha'apai volcanic aerosol // *Geophysical Research Letters*, 2023. 50, e2022GL101978. <https://doi.org/10.1029/2022GL101978>
- Cai Z., Griessbach S., Hoffmann L.* Improved estimation of volcanic SO<sub>2</sub> injections from satellite retrievals and Lagrangian transport simulations: the 2019 Raikoke eruption // *Atmos. Chem. Phys.*, 2022. 22, 6787–6809, <https://doi.org/10.5194/acp-22-6787-2022>
- Chouza F., Leblanc T., Barnes J., Brewer M., Wang P., Koon D.* Long-term (1999–2019) variability of stratospheric aerosol over Mauna Loa, Hawaii, as seen by two co-located lidars and satellite measurements, // *Atmos. Chem. Phys.*, 2020. 20, 6821–6839, <https://doi.org/10.5194/acp-20-6821-2020>
- Clarisse L., Coheur P.-F., Theys N., Hurtmans D., Clerbaux C.* The 2011 Nabro eruption, a SO<sub>2</sub> plume height analysis using IASI measurements // *Atmos. Chem. Phys.*, 2014. 14, 3095–3111, <https://doi.org/10.5194/acp-14-3095-2014>.
- de Leeuw J., Schmidt A., Witham C. S., Theys N., Taylor I. A., Grainger R. G., Pope R.J., Haywood J., Osborne M., Kristiansen N.I.* The 2019 Raikoke volcanic eruption – Part 1: Dispersion model simulations and satellite retrievals of volcanic sulfur dioxide // *Atmos. Chem. Phys.*, 2021. 21, 10851–10879, <https://doi.org/10.5194/acp-21-10851-2021>,
- Divinskii L. I., Ivlev L.S.* O vode i aerolyah vulkanicheskogo proishozhdeniya v visokih sloyah atmosfery // *Prirodnaya Sreda*. 2012. №4 (25), pp. 254–261 (in Russian)
- Fedotov S.A.* Magmatichekkiye pitayushchiye sistemy i mekhanizm izverzheniy vulkanov (Magmatic feeding systems and the mechanism of volcanic eruptions.). Moscow: Nauka, 2006. 455 p.
- Fedotov S.A.* Vulkanizm i seysmichnost, nauka, obshchestvo, sobytiya i zhizn (statyi, besedy i vystupleniya 1952–2002 gg. (Volcanism and seismicity, science, society, events and life (Articles, talks and speeches (1952 – 2002)). Petropavlovsk-Kamchatsky: Novaya Kniga Holding Publ., 2003. 184 p., illustrated ISBN5-87750-101-1
- Fisher B.L., Krotkov N.A., Bhartia P.K., Li C., Carn S.A., Hughes E., Leonard P.J.T.* A new discrete wavelength backscattered ultraviolet algorithm for consistent volcanic SO<sub>2</sub> retrievals from multiple satellite missions // *Atmos. Meas. Tech.*, 2019. 12, 5137–5153, <https://doi.org/10.5194/amt-12-5137-2019>
- Forster P., Ramaswamy V., Artaxo P., Bernsten T., Betts R., Fahey D., Haywood J., Lean J., Low D., Myhre G., Nganga J., Prinn R., Raga G., Schulz M., Dorland R.V.* Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing, in: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, edited by: Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K., Tignor, M., and Miller, H., 129–234, Cambridge University Press, United Kingdom and New York, NY, USA, 2008.
- Girina O.A., Gordeev E.I.* KVERT project: reduction of volcanic hazards for aviation from explosive eruptions of Kamchatka and Northern Kuriles volcanoes // *Institute of Volcanology and Seismology FED RAS*, 2007. № 2 (132). C. 100–109 (in Russian)
- Girina O.A., Manevich A.G., Melnikov D.V., Nujdaev A.A., Lupyay E.A.* Aktivnost vulkanov Kamchatki i Kurilskih ostrovov v 2019 g. i ih opasnost dlya aviatsii // *Vulkanizm i svyazannye s nim processy. Materiali XXIII ezhodnoi nauchnoi konferentsii posvyaschennoi Dnyu vulkanologa\_2020 g. – Petropavlovsk-Kamchatskii\_IViS DVO RAN\_2020*. P. 11–14.
- Girina O.A.* On precursor of Kamchatkan volcanoes eruptions based on data from satellite monitoring // *J. Volcanolog. Seismol.* 6, 142–149. 2012. <https://doi.org/10.1134/S0742046312030049>
- Gordeev E.I., Girina O.A.* Volcanoes and the threat they pose for aircraft // *Vestnik Rossiiskoi Akademii Nauk*, 2014, vol. 84, no. 2, pp. 134–142. <https://doi.org/10.7868/S0869587314020121>
- Gorkavyy N., Krotkov N., Li C., Lait L., Colarco P., Carn S., DeLand M., Newman P., Schoeberl M., Taha G., Torres O.,*

- Vasilkov A., Joiner J.* Tracking aerosols and SO<sub>2</sub> clouds from the Raikoke eruption: 3D view from satellite observations // *Atmos. Meas. Tech.*, 2021. 14, 7545–7563, <https://doi.org/10.5194/amt-14-7545-2021>,
- Guffanti M., Casadevall T.J., Budding K.* Encounters of aircraft with volcanic ash clouds: a compilation of known incidents, 1953–2009 // U.S. Geological Survey Data Series 545, 2010. ver. 1.0, 12 p., plus 4 appendixes including the compilation database.
- Haywood J. M., et al.*, Observations of the eruption of the Sarychev volcano and simulations using the HadGEM2 climate model // *J. Geophys. Res.*, 2010. 115, D21212, <https://doi.org/10.1029/2010JD014447>
- Ivlev L.S., Kolosov A.S., Terokhin S.N.* Eruptivnyye vulkanicheskiye protsessy: mekhanizmy i kharakteristiki (Eruptive volcanic processes: Mechanisms and characteristics) // *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta*, 2008. Vol. 4, No 2. pp.35–48. (In Russian).
- Jethva H., Torres, O.* Satellite-based evidence of wavelength-dependent aerosol absorption in biomass burning smoke inferred from Ozone Monitoring Instrument // *Atmos. Chem. Phys.*, 2011. 11, 10541–10551, <https://doi.org/10.5194/acp-11-10541-2011>
- Khaykin S. et al.* Global perturbation of stratospheric water and aerosol burden by Hunga eruption // *Commun. Earth Environ.* 2022a. 3, 316. <https://doi.org/10.1038/s43247-022-00652-x>
- Khaykin S.M., de Laat A.T.J., Godin-Beekmann S. et al.* Unexpected self-lofting and dynamical confinement of volcanic plumes: the Raikoke 2019 case // *Sci Rep.* 2022b. 12, 22409 <https://doi.org/10.1038/s41598-022-27021-0>
- Kloss C., Berthet G., Sellitto P., Ploeger F., Taha G., Tidiga M., Eremenko M., Bossolasco A., Jégou, F., Renard J.-B., Legras B.* Stratospheric aerosol layer perturbation caused by the 2019 Raikoke and Ulawun eruptions and their radiative forcing // *Atmos. Chem. Phys.*, 2021. 21, 535–560, <https://doi.org/10.5194/acp-21-535-2021>
- Kondratyev K.Ya.* Kompleksnyy monitoring posledstviy izverzheniya vulkana Pinatubo (Comprehensive monitoring of the consequences of the eruption of Mount Pinatubo) // *Issledovaniya Zemli iz kosmosa*. 1993. No. 1., pp. 111–122 (In Russian).
- Kondratyev K.Ya., Ivlev L.S., Krapivin V.F.* Svoystva, protsessy obrazovaniya i posledstviya vozdeystviy atmosfernogo aerolya: ot nano – do global'nykh masshtabov (Properties, formation processes and consequences of atmospheric aerosol impacts: from nano to global scales). Saint Petersburg: 2007. VVM Publ., 858 p. (In Russian).
- Krotkov N. A., et al.* Validation of SO<sub>2</sub> retrievals from the Ozone Monitoring Instrument over NE China // *J. Geophys. Res.*, 2008. 113, D16S40, <https://doi.org/10.1029/2007JD008818>
- Laverov N.P., Dobretsov N.L., Bogatnikov O.A., Bondur V.G. et al.* Modern and Holocene volcanism in Russia / Ed. by N.P.Laverov. Moscow: Nauka, 2005. 604 p. (In Russian).
- Lu J., Lou S., Huang X., Xue L., Ding K., Liu T., et al.* Stratospheric aerosol and ozone responses to the Hunga Tonga-Hunga Ha'apai volcaniceruption // *Geophysical Research Letters*, 2023. 50, e2022GL102315. <https://doi.org/10.1029/2022GL102315>
- Manevich A.G., Girina O.A., Melnikov D.V., Bril A.A., Romanova I.M., Sorokin A.A., Kramareva L.S., Korolev S.P.* Klyuchevskoy volcano eruptions in 2023–2024 based on remote sensing data in the VolSatView information system // *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* 2024. T. 21. № 3. С. 94–103. (in Russian)
- Marshall L.R., Maters E.C., Schmidt A. et al.* Volcanic effects on climate: recent advances and future avenues // *Bull Volcanol.* 2022. 84, 54. <https://doi.org/10.1007/s00445-022-01559-3>
- Melnikov D.V., Ushakov S.V.* Monitoring atmosfernogo soderzhaniya SO<sub>2</sub> pri krupnykh izverzheniyakh vulkanov Kamchatki za 2007 g. posredstvom sputnikovykh metodov issledovaniy (Monitoring of atmospheric SO<sub>2</sub> content during large volcanic eruptions in Kamchatka in 2007 using satellite research methods) // *Proceedings of Conference “Geofizicheskiy monitoring i problemy seysmicheskoy bezopasnosti Dal'nego Vostoka Rossii”*. Petropavlovsk-Kamchatsky: Russian Academy of Sciences, Kamchatka Branch Publ., 2008. Vol. 1, pp. 101–104. (In Russian). <http://www.emsd.ru/konf071112/pdf/t1/str101.pdf>
- Muser L.O. et al.* Particle aging and aerosol–radiation interaction affect volcanic plume dispersion: Evidence from the Raikoke 2019 eruption // *Atmos. Chem. Phys.* 20, 2020. 15015–15036. <https://doi.org/10.5194/acp-20-15015-2020>
- Ozerov A.Y., Girina O.A., Zharinov N.A. et al.* Eruptions in the Northern Group of Volcanoes, in Kamchatka, during the Early 21st Century. // *J. Volcanolog. Seismol.* 14, 1–17. 2020. <https://doi.org/10.1134/S0742046320010054>
- Pardini F., Burton M., Arzilli F., La Spina G., Polacci M.* SO<sub>2</sub> emissions, plume heights and magmatic processes inferred from satellite data: The 2015 Calbuco eruptions // *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2018. 361, 12–24. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2018.08.001>
- Platt U., Stutz J.* Differential optical absorption spectroscopy – Springer-Verlag, New-York, Berlin, Heidelberg, 2008. – 593 p
- Rasch P.J., Tilmes S., Turco R.P., Robock A., Oman L., Chen C.-C., Stenchikov G.L., Garcia R.R.* An overview of geo-engineering of climate using stratospheric sulphate aerosols, *Philos. T. Roy. Soc. A*, 2008. 366, 4007–4037. <https://doi.org/10.1098/rsta.2008.0131>
- Rashidov V.A., Girina O.A., Ozerov A.Yu., Pavlov N.N.* The June 2019 Eruption of Raikoke Volcano (The Kurile Islands) // *Bulletin of Kamchatka Regional Association “Educational-Scientific Center”*. Earth sciences. Issue 42. No. 2. 2019, pp. 5–8. <https://doi.org/10.31431/1816-5524-2019-2-42-5-8>
- Reed B.E., Peters D.M., McPheat R., Grainger R.G.* The Complex Refractive Index of Volcanic Ash Aerosol Retrieved from Spectral Mass Extinction // *J. Geophys. Res. Atmos.* 2018, 123, pp. 1339–1350, <https://doi.org/10.1002/2017JD027362>
- Robock A.* Volcanic eruptions and climate // *Rev. Geophys.*, 2000. 38, 191–219, <https://doi.org/10.1029/1998RG000054>
- Romero J.E., Morgavi D., Arzilli F., Daga R., Caselli A., Reckziegel F., Perugini D.* Eruption dynamics of the 22–23 April 2015 Calbuco Volcano (Southern Chile): Analyses of tephra fall deposits // *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2016. 317, 15–29. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2016.02.027>
- Rybin A., Chibisova M., Webley P., Steensen T., Izbekov P., Neal C., Realmuto V.* Satellite and ground observations of the June 2009 eruption of Sarychev Peak volcano, Matua Island,

- Central Kuriles // *Bull. Volcanol.*, 2011. 73(9), 1377–1392, <https://doi.org/10.1007/s00445-011-0481-0>
- Sato M., Hansen J.E., McCormick M.P., Pollack J.B.* Stratospheric aerosol optical depths, 1850–1990 // *J. Geophys. Res.* 1993. 98, 22987. <https://doi.org/10.1029/93JD02553>
- Sawamura P., et al.* Stratospheric AOD after the 2011 eruption of Nabro volcano measured by lidars over the Northern Hemisphere, *Environ. Res. Lett.*, 2012. 7(3), 034,013, <https://doi.org/10.1088/1748-9326/7/3/034013>
- Semenov S.M., Izrael Yu.A., Gruza G.V., Rankova E.Ya.* Изменения глобальной температуры и региональные риски при некоторых стабилизационных сценариях антропогенной эмиссии диоксида углерода и метана. В кн. Изменение окружающей среды и климата природные и связи с ними техногенные катастрофы. Т. 6: изменение климата влияние земных и внеземных факторов / Отв. ред. Г.С. Голитсын. М.: ИФА РАН, IFZ РАН, 2008. 24–36. (In Russian).
- Stenchikov G., Delworth T.L., Ramaswamy V., Stouffer R.J., Wittenberg A., Zeng F.* Volcanic signals in oceans // *J. Geophys. Res.*, 2009. 114, D16104, <https://doi.org/10.1029/2008JD011673>
- Stenchikov G., Ukhov A., Osipov S., Ahmadov R., Grell G., Cady-Pereira K., Mlawer E., Iacono M.* How Does a Pinatubo-Size Volcanic Cloud Reach the Middle Stratosphere? // *J. Geophys. Res.—Atmos.*, 2021. 126, e2020JD033829, <https://doi.org/10.1029/2020JD033829>
- Theys N., De Smedt I., Yu H., Danckaert T., van Gent J., Hörmann C., Wagner T., Hedelt, P., Bauer H., Romahn F., Pedergnana M., Loyola D., Van Roozendaal M.* Sulfur dioxide retrievals from TROPOMI onboard Sentinel-5 Precursor: algorithm theoretical basis // *Atmos. Meas. Tech.*, 2017. 10, 119–153, <https://doi.org/10.5194/amt-10-119-2017>
- Thompson D.W., Solomon S.* Understanding recent stratospheric climate change, *J. Climate*, 2009. 22, 1934–1943, <https://doi.org/10.1175/2008JCLI2482.1>
- Thordarson Th., Self S.* Atmospheric and environmental effects of the 1783 – 1784 Laki eruption: A review and reassessment // *J. Geophys. Res.*, 2003. 108(D1), 4011, <https://doi.org/10.1029/2001JD002042>
- Toohey M., Krüger K., Schmidt H., Timmreck C., Sigl M., Stoffel M., Wilson R.* Disproportionately strong climate forcing from extratropical explosive volcanic eruptions // *Nat. Geosci.*, 2019. 12, 100–107, <https://doi.org/10.1038/s41561-018-0286-2>
- Veefkind P., Sneep M.* OMDOA03 README FILE: [http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/Aura/data-holdings/OMI/documents/v003/OMDOA03\\_README\\_V003.shtml](http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/Aura/data-holdings/OMI/documents/v003/OMDOA03_README_V003.shtml) (last access: 14 January 2012), 2009.
- Vermote E.F., Roger J.C., Ray J.P.* MODIS Surface Reflectance User's Guide Collection 6. [Accessed 23 June 2016]; 2015 May; [http://modis-sr.ltdri.org/guide/MOD09\\_UserGuide\\_v1.4.pdf](http://modis-sr.ltdri.org/guide/MOD09_UserGuide_v1.4.pdf)
- von Savigny C., Timmreck C., Buehler S.A., Burrows J.P., Giorgetta M., Hegerl G., Horvath A., Hoshyaripour G. A., Hoose C., Quaas J., Malinina E., Rozanov A., Schmidt H., Thomason L., Toohey M., Vogel B.* The Research Unit VolImpact: Revisiting the volcanic impact on atmosphere and climate – preparations for the next big volcanic eruption // *Meteorol. Z.*, 2020. 29, 3–18, <https://doi.org/10.1127/metz/2019/0999>
- Watson E.J., Swindles G.T., Stevenson J.A., Savov I., Lawson I.T.* The transport of Icelandic volcanic ash: Insights from northern European cryptotephra records // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2016. 121, 7177–7192. <https://doi.org/10.1002/2016JB013350>
- Wells A.F., Jones A., Osborne M., Damany-Pearce L., Partridge D.G., Haywood J.M.* Including ash in UKESM1 model simulations of the Raikoke volcanic eruption reveals improved agreement with observations // *Atmos. Chem. Phys.*, 2023, 3985–4007, <https://doi.org/10.5194/acp-23-3985-2023>
- Yang K., Liu X., Bhartiya P.K., Krotkov N.A., Carn S.A., Hughes E.J., Krueger A.J., Spurr R.J.D., Trahan S.G.* Direct retrieval of sulfur dioxide amount and altitude from spaceborne hyperspectral UV measurements: Theory and application // *J. Geophys. Res.*, 2010. 115, D00L09, <https://doi.org/10.1029/2010JD013982>
- Zuev V.V. Zueva N.E.* Volcanogenic disturbances of the stratosphere as the principle regulator of the long-term behavior of the ozonosphere from 1979 to 2008 // *Opt. Atmos. Okeana* 24 (1), 30–34. 2011. (In Russian).