

Наблюдения стратосферного аэрозоля на лидарных станциях Росгидромета после извержения вулкана Райкоке в июне 2019 года

В.С. Гребенников¹, Д.С. Зубачев², В.А. Коршунов²,
Д.Г. Сахибгареев², И.А. Черных^{3*}

¹Центральная аэрологическая обсерватория
141700, г. Долгопрудный, Московская обл., ул. Первомайская, 3

²НПО «Тайфун»
249038, г. Обнинск, Калужская обл., ул. Победы, 4

³Западно-Сибирское УГМС
630099, г. Новосибирск, ул. Советская, 30

Поступила в редакцию 13.02.2020 г.

Приведены результаты наблюдений стратосферного аэрозоля на лидарных станциях Росгидромета после взрывного извержения вулкана Райкоке (Курильские о-ва, 48,29° с.ш., 153,25° в.д.) в июне 2019 г. С использованием прямого траекторного анализа и данных наблюдений спутникового лидара Calipso прослежено распространение аэрозольного следа в стратосфере от вулкана вокруг полюса до Западной Сибири в течение месяца после извержения. Представлены данные лидарных измерений вулканического аэрозоля с конца июля 2019 г. на лидарных станциях Росгидромета в Обнинске, Знаменске, Новосибирске и Петропавловске-Камчатском. Вулканический аэрозоль наблюдался в слое от 13 до 18 км. Величина интегрального коэффициента обратного рассеяния в слое менялась от максимальных значений $(0,8-1,6) \cdot 10^{-3}$ стер⁻¹ в августе–сентябре 2019 г. до $(0,2-0,3) \cdot 10^{-3}$ стер⁻¹ к концу года.

Ключевые слова: стратосферный аэрозоль, вулканическое извержение, лидар, обратное рассеяние; stratospheric aerosol, volcanic eruption, lidar, backscattering.

Введение

Вулканические извержения сильно влияют на состояние стратосферного аэрозоля; 21–22 июня 2019 г. произошла серия взрывных извержений вулкана Райкоке (Курильские о-ва, 48,29° с.ш., 153,25° в.д.) [1]. Мощное куполообразное облако пепла, достигшее стратосферных высот, было зафиксировано 22 июня с борта МКС. Вместе с пеплом было выброшено большое количество двуокиси серы. По оценкам [2], общая масса SO₂, выброшенной в атмосферу вулканом Райкоке, составила от 1,2 до 1,5 Мт. Примерно через месяц образовавшийся сернокислотный стратосферный аэрозоль начал регистрироваться лидарными станциями Росгидромета в Обнинске, Знаменске и Новосибирске. Отдельные измерения были также проведены в Петропавловске-Камчатском. В настоящей работе приведены результаты лидарных наблюдений аэрозольных слоев от вулкана Райкоке в 2019 г.

Эволюция аэрозольного выброса от вулкана Райкоке

Первоначально газопылевое облако вулканического выброса двинулось на северо-восток. Затем оно попало в сферу действия циклона и стало отклоняться на запад. Спектрометр Metop-A&B GOME-2 [3] зафиксировал обширное облако SO₂, центр которого на 27 июня расположился к северо-западу от Охотского моря в районах Восточной Сибири. К этому времени образовались слои сернокислотного аэрозоля, которые были зарегистрированы лидаром Calipso на спутнике Callisto [4], на высотах от 10 до 15 км.

На рис. 1 показано расположение наиболее плотных облаков аэрозоля в координатах «долгота–широта» по данным Calipso за 27–29 июня 2019 г. Там же представлены результаты траекторного анализа в прямом направлении, проведенного с помощью общедоступной программы HYSPLIT, размещенной на сайте лаборатории NOAA [5]. Построение траекторий проводилось от вулкана Райкоке, начиная от даты извержения, с высоты 13 км над уровнем моря. Использовался ансамблевый метод построения. Положение точек на траекториях соответствует 28 июня. Видно достаточно хорошее

* Виктор Сергеевич Гребенников (greb_v_s_1952@mail.ru); Дмитрий Сергеевич Зубачев (zubachev@gratyrhoon.ru); Владимир Алексеевич Коршунов (korshunov@gratyrhoon.ru); Джалиль Габбасович Сахибгареев (dg@gratyrhoon.ru); Игорь Анатольевич Черных (igor@meteo-nso.ru).

наложение точек траекторий на область наблюдения аэрозоля. Это подтверждает, что наблюдаемый лидаром Calipso аэрозоль связан с вулканическим извержением. С другой стороны, это совпадение указывает на то, что построенные прямые траектории действительно соответствуют распространению аэрозольного облака от вулкана Райкоке.

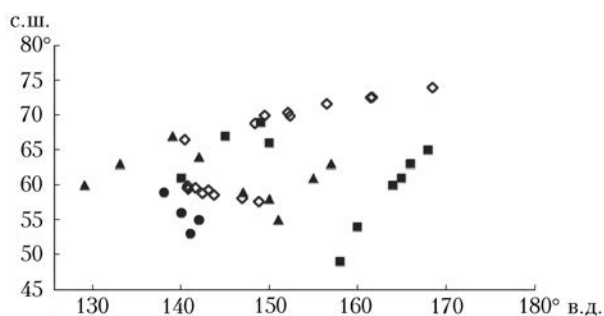


Рис. 1. Координаты аэрозольных слоев в стратосфере по наблюдениям лидара Calipso: квадраты – 27 июня; треугольники – 28 июня; кружки – 29 июня; ромбы – группа точек из ансамбля прямых траекторий на 28 июня

Рассмотрим теперь более полную картину распространения аэрозольного следа – от вулкана Райкоке до мест наблюдений. В программе HYSPLIT

максимальное время построения траектории вперед составляет 10 сут. Однако этого недостаточно, чтобы проследить весь путь распространения аэрозоля до пунктов лидарных наблюдений. Поэтому был применен прием сопряжения последовательности из трех ансамблей траекторий. Как и выше, начальная точка первого ансамбля траекторий была взята в месте расположения вулкана Райкоке на высоте 13 км. Начальная точка второго ансамбля траекторий задавалась в области наибольшей плотности расположения конечных точек первого ансамбля. Для выбора этой области конечные точки траекторий изображались на отдельном графике. Аналогичным образом выбиралась начальная точка третьего ансамбля траекторий. Результат построения приведен на рис. 2.

В левой верхней части рис. 2 показано продвижение траекторий от вулкана Райкоке (звездочка) ($48,29^\circ$ с.ш., $153,25^\circ$ в.д.), начиная с даты извержения (22 июня 2019 г.). Штриховая окружность показывает область регистрации аэрозольных слоев лидаром Calipso. Кружок в конечной области первого ансамбля обозначает стартовую точку для второго ансамбля траекторий, которая находится на юге Аляски (65° с.ш., 140° з.д.), на 2 июля 2019 г. В правой верхней части рис. 2 показано продвижение

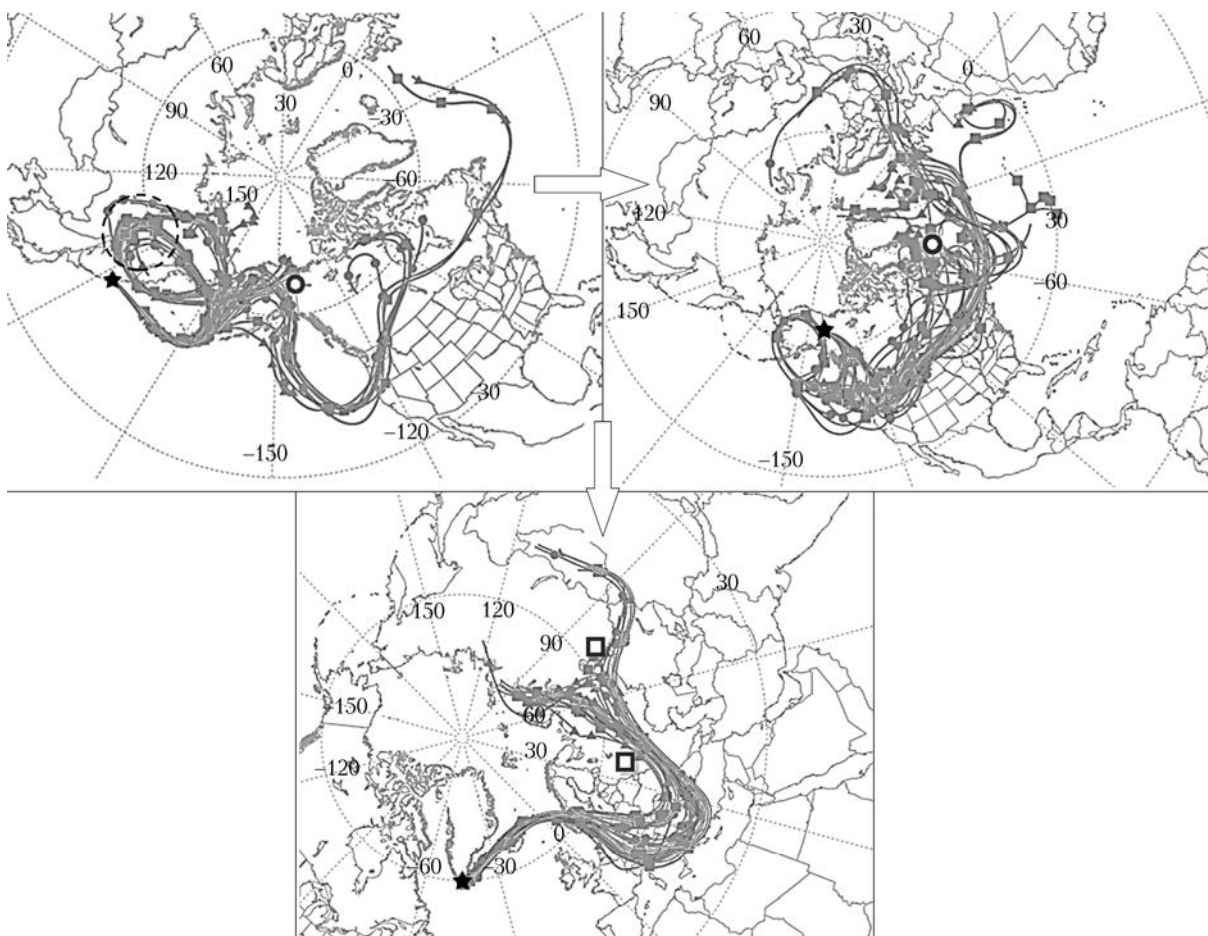


Рис. 2. Три последовательных ансамбля прямых траекторий воздушных масс, иллюстрирующие распространения аэрозоля после извержения вулкана Райкоке

траекторий второго ансамбля от этой стартовой точки, обозначенной здесь звездочкой. Кружок показывает стартовую точку для третьего ансамбля траекторий (60° с.ш., 40° з.д.), расположенную на южной оконечности Гренландии, на 12 июля 2019 г. В нижней части рис. 2 показано распространение траекторий третьего ансамбля в сторону Европы с 12 по 21 июля 2019 г. Расположение Обнинска и Новосибирска показано квадратами. Видно, что в середине июля аэрозольный след достигает сначала европейской части РФ, а затем Западной Сибири. Как отмечалось выше, примерно в это время в лидарных измерениях начинают обнаруживаться слои повышенного аэрозольного рассеяния. Рассмотрим результаты лидарных наблюдений более подробно.

Результаты лидарных измерений и их обсуждение

Наблюдения аэрозольных слоев от вулкана Райкоке проводились с помощью лидаров АК-3, размещенных в пунктах геофизического мониторинга Росгидромета. Регулярные измерения в рассматриваемый период (июль–декабрь 2019 г.) выполнялись на базовой лидарной станции в Обнинске ($55,1^\circ$ с.ш., $36,6^\circ$ в.д.) и на лидарной станции в Новосибирске ($55,0^\circ$ с.ш., $82,9^\circ$ в.д.). Несколько позже систематические наблюдения начались в Знаменске ($48,6^\circ$ с.ш., $45,7^\circ$ в.д.), отдельные измерения выполнены в Петропавловске-Камчатском ($53,0^\circ$ с.ш., $158,65^\circ$ в.д.). Зондирование проводилось на длинах волн $\lambda = 355$ и 532 нм. Дополнительные сведения по лидару АК-3 можно найти в [6].

В конце июля 2019 г. в стратосфере над Обнинском и Новосибирском начали появляться аэрозольные слои повышенного рассеяния на высотах от 12 до 16 км. Тропопауза в это время располагалась на уровне от 10 до 12 км. Высотные профили $R(532)-1$ (где $R(532)$ – отношение обратного рассеяния на длине волны 532 нм), соответствующие первым наблюдениям аэрозольных слоев в Обнинске и Новосибирске, приведены на рис. 3 (верхний и средний ряд графиков). В Обнинске пиковый слой с величиной $R-1$, достигавшей 4, наблюдался 6 августа 2019 г. На рис. 3 представлены также средние за август профили (графики справа). Для сравнения штриховой линией изображен средний (фоновый) профиль, наблюдавшийся в Обнинске в августе 2018 г.; сравнение показывает, что вулканический аэрозоль присутствует на высотах от 12 до 18 км.

Отношение коэффициентов обратного аэрозольного рассеяния на $\lambda = 355$ и 532 нм для вулканического аэрозоля составляло $2 \pm 0,5$, что соответствует данным моделирования [7]. С использованием оптико-микрофизической модели стратосферного аэрозоля [7] были проведены оценки интегральных по спектру размеров параметров аэрозоля, включая коэффициент ослабления на $\lambda = 532$ нм, эффективный радиус r_{32} , площадь поверхности S и объем частиц V в единице объема воздуха. Средние высот-

ные профили интегральных параметров для августа представлены на рис. 3 (нижний ряд графиков).

Обобщенная картина наблюдений на всех станциях приведена на рис. 4, где показан временной ход интегрального по слою от 13 до 18 км коэффициента обратного аэрозольного рассеяния $B(532)$, стер^{-1} . Нижний уровень 13 км выбран для исключения перистых облаков, поднимавшихся в некоторых случаях до 12 км. С конца июля начинается рост величины $B(532)$, сначала в Обнинске, а затем в Новосибирске в соответствии с представленными выше результатами траекторного анализа. В августе и сентябре значения $B(532)$ достигают 10^{-3} стер^{-1} и более, что на порядок превышает фоновые уровни 10^{-4} стер^{-1} , наблюдавшиеся в 2014–2018 гг. [8]. Отметим для сравнения, что максимальные значения $B(532)$, зарегистрированные в Обнинске [9] и Томске [10] в слое от 15 до 30 км после извержения вулкана Пинатубо в 1991 г., составляли $\sim 4 \times 10^{-3}$ стер^{-1} . Оптическую толщину слоя τ_c можно оценить умножением $B(532)$ на характерную величину лидарного отношения для вулканического стратосферного аэрозоля 45 стер [7]. В частности, величина $B(532) = 10^{-3}$ стер^{-1} соответствует $\tau_c = 0,045$.

На рис. 4 в августе в Обнинске выделяются две волны прихода аэрозоля с промежутком ~ 20 дней. Если учесть, что среднезональная скорость ветра летом на широте 55° составляет ~ 14 м/с [11], то указанное время как раз соответствует одному обороту аэрозольного облака вокруг Земли на этой широте.

Сопоставим данные измерений на разных станциях. Характерные величины $B(532)$ для Новосибирска несколько меньше, чем для Обнинска, что можно объяснить распространением облака вулканического аэрозоля с запад на восток и постепенным его рассеянием в меридиональном направлении.

В Петропавловске-Камчатском первое измерение было проведено 29 июня 2019 г., т.е. уже после извержения вулкана. При этом высокого уровня аэрозоля зафиксировано не было, что объясняется первоначальным распространением аэрозольного облака от вулкана на северо-восток, а затем вокруг Камчатки. В октябре на Камчатке, так же как и в других пунктах наблюдений, наблюдались повышенные уровни $B(532)$.

В Знаменске, находящемся на $7,5^\circ$ южнее других станций, первые измерения после извержения были проведены позже, однако зарегистрированные там уровни $B(532)$ были выше, чем в тот же период времени в Обнинске и Новосибирске.

В октябре–ноябре на всех четырех станциях величины $B(532)$ находились примерно на одном уровне $3 \cdot 10^{-4}$ стер^{-1} . Таким образом, к ноябрю оставалось еще трехкратное превышение фонового уровня 10^{-4} стер^{-1} в 2014–2018 гг.

Завершая описание результатов измерений коэффициента обратного рассеяния, отметим, что сопоставимые по величине рассеяния аэрозольные образования, связанные с извержением вулканов средних широт, не наблюдались с 2008–2009 гг., когда происходили извержения вулканов Ожмок и Касато

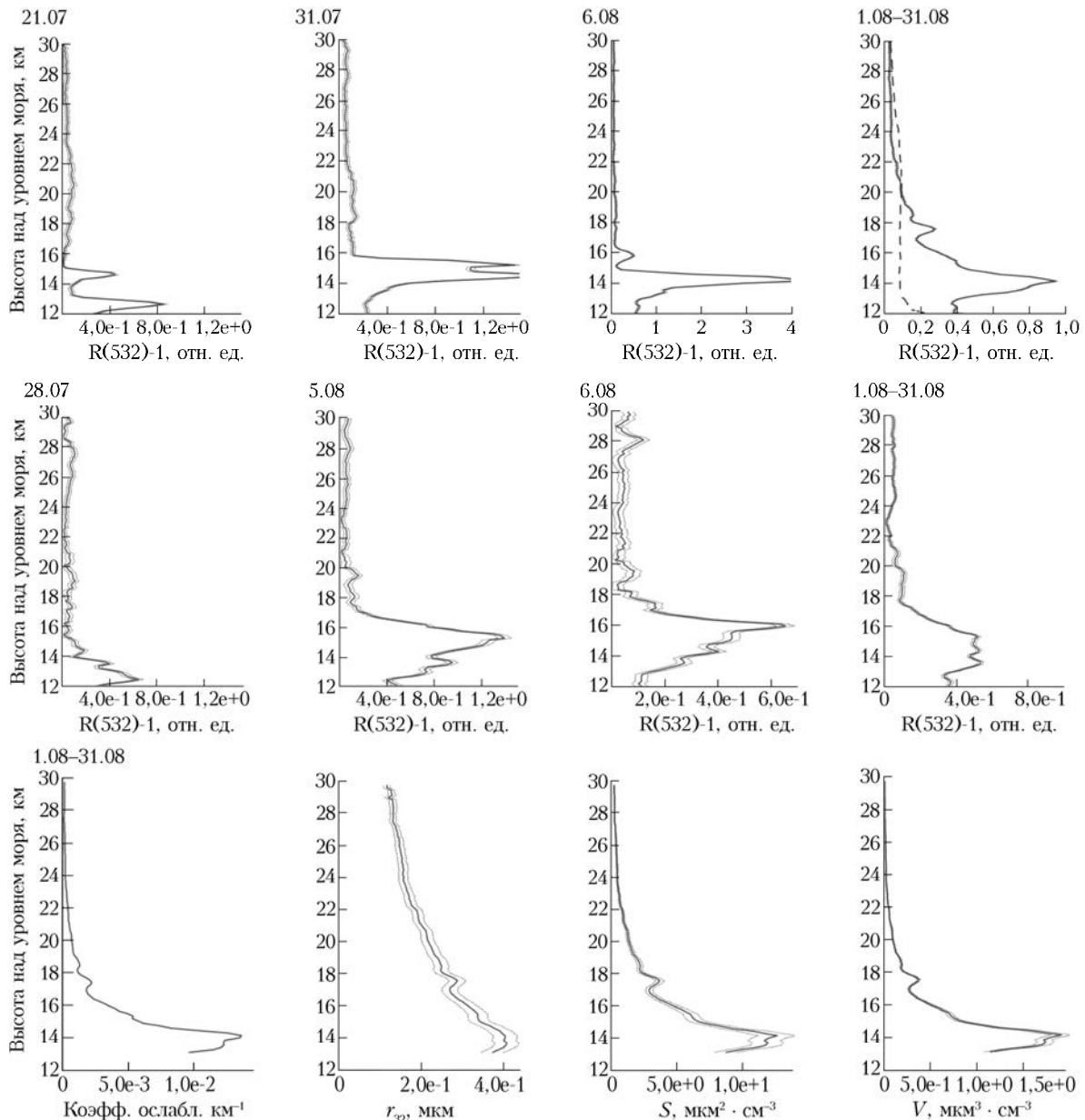


Рис. 3. Высотные профили отношения обратного рассеяния $R(532)$ по измерениям в Обнинске (верхний ряд) и Новосибирске (средний ряд); высотные профили интегральных параметров аэрозоля для Обнинска (нижний ряд). На графике в верхнем ряду справа показан также высотный профиль $R(532)$ за август 2018 г. (штриховая кривая); серые кривые показывают коридор погрешностей

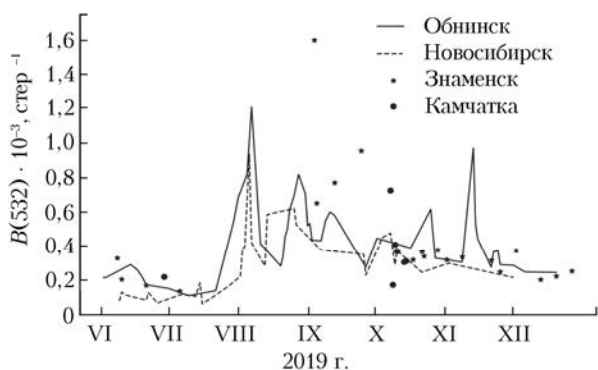


Рис. 4. Временной ход интегрального коэффициента обратного рассеяния $B(532)$ в слое 13–18 км в июне–декабре 2019 г. на четырех станциях лидарной сети Росгидромета

чи ($53,4^\circ$ с.ш. и $52,4^\circ$ с.ш., Алеутские о-ва, 2008 г.), а также вулкана пик Сарычева ($48,14^\circ$ с.ш., Курильские о-ва, 2009 г.) [12].

Для оценки влияния наблюдавшегося стратосферного аэрозольного слоя на приземную температуру воспользуемся результатами моделирования вулканического извержения в средних широтах Северного полушария, выполненного в [13]. Согласно этой работе при пиковой среднезональной оптической толщине образовавшегося аэрозоля $\tau = 0,3$ понижение приземной температуры летом следующего после извержения года составило $-(1 \div 1,5)^\circ\text{C}$.

На основании данных, представленных на рис. 4, можно считать, что через два месяца после извержения Райкоке аэрозоль уже более или менее равномерно

распространился в зональном направлении. Тогда среднезональный уровень $B(532)$ задается в пределах $(4 \pm 1) \cdot 10^{-4}$ стер $^{-1}$. При характерной величине лидарного отношения для вулканического стратосферного аэрозоля 45 стер получим оценку τ в пределах $0,014 \div 0,023$. Считая, что эффект понижения температуры пропорционален τ , можно оценить влияние вулканического извержения Райкоке на приземную температуру средних широт Северного полушария в пределах $-(0,05 \div 0,11)$ °С.

Заключение

В июне 2019 г. произошло взрывное извержение вулкана Райкоке (Курильские о-ва). Продукты извержения сформировали стратосферный аэрозольный слой, который с конца июля фиксировался на лидарных станциях Росгидромета в Обнинске, Новосибирске, Знаменске и Петропавловске-Камчатском. Первоначальное распространение аэрозольного облака в течение месяца от вулкана до пунктов наблюдения в Обнинске и Новосибирске прослежено методом траекторного анализа и на отдельных участках траекторий подтверждено данными спутникового лидара Calipso. Интегральный коэффициент обратного рассеяния в слое от 13 до 18 км был максимальным $[(0,8 \div 1,6) \cdot 10^{-3}$ стер $^{-1}$] в августе–сентябре 2019 г., а затем постепенно снижался до значений $(0,2 \div 0,3) \cdot 10^{-3}$ стер $^{-1}$ к концу года. Сравнение результатов измерений и литературных данных по численному моделированию сходного вулканического извержения дает оценку возможного влияния вулкана Райкоке на приземную температуру средних широт Северного полушария в пределах $-(0,05 \div 0,11)$ °С.

1. Гирин О.А., Лунян Е.А., Уваров И.А., Крамарева Л.С. Извержение вулкана Райкоке 21 июня 2019 года // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16, № 3. С. 303–307.
2. Prata A., Mingari L., Folch A. Satellite observations reveal complex stratospheric dynamics during the 2019

- Raikoke eruption // AGU Fall Meeting. 9–13 December 2019, San Francisco.
3. EUMETSAT. Eruption of the Raikoke volcano [Electronic resource]. URL: https://www.eumetsat.int/website/home/Images/ImageLibrary/DAT_4459227.html (last access: 27.01.2020).
 4. NASA. Calipso products. Lidar browse images [Electronic resource]. URL: https://www.calipso.larc.nasa.gov/products/lidar/browse_images/show_calendar.php (last access: 27.01.2020).
 5. Air Resources Laboratory. Transport & Dispersion Modeling. HYSPLIT [Electronic resource]. URL: http://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT_traj.php (last access: 27.01.2020).
 6. Коршунов В.А., Зубачев Д.С. Характеристики стратосферного аэрозоля по данным лидарных измерений над г. Обнинск в 2012–2015 гг. // Оптика атмосф. и океана. 2016. Т. 29, № 12. С. 1034–1042; Korshunov V.A., Zubachev D.S. Characteristics of stratospheric aerosol from data of lidar measurements over Obninsk in 2012–2015 // Atmos. Ocean. Opt. 2017. V. 30, N 3. P. 226–233.
 7. Коршунов В.А., Зубачев Д.С. Об определении параметров стратосферного аэрозоля по данным двухволнового лидарного зондирования // Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана. 2013. Т. 49, № 2. С. 196–207.
 8. Коршунов В.А. Фоновый стратосферный аэрозоль и его радиационные характеристики по данным лидарных наблюдений в 2014–2017 гг. в городе Обнинске // Тр. ГГО. 2018. Вып. 589. С. 50–73.
 9. Хмелевцов Е.Д., Кауфман Ю.Г., Коршунов В.А., Светогоров Е.Д., Хмелевцов А.С. Лазерное зондирование атмосферных параметров на Обнинской лидарной станции НПО «Тайфун» // Вопросы физики атмосферы. Санкт-Петербург: Гидрометеиздат, 1998. С. 358–392.
 10. Зуев В.В. Лидарный контроль стратосферы. Новосибирск: Наука, 2004. 306 с.
 11. Справочник «Атмосфера». Л.: Гидрометеиздат, 1981. 600 с.
 12. Zuev V.V., Burlakov D., Nevzorov A.V., Pravdin V.L., Savelieva E.S., Gerasimov V.V. 30-year lidar observations of the stratospheric aerosol layer state over Tomsk (Western Siberia, Russia) // Atmos. Chem. Phys. 2017. V. 17. P. 3067–3081.
 13. Oman L., Robock A., Stenchikov G., Schmidt G.A., Ruedy R. Climate response to high-latitude volcanic eruptions // J. Geophys. Res. 2005. V. 110. DOI: 10.1029/2004JD005487.

V.S. Grebennikov, D.S. Zubachev, V.A. Korshunov, D.G. Sakhigbareev, I.A. Chernikh. Observations of stratosphere aerosol at lidar stations of Roshydromet after the eruption of the Raikoke volcano in June 2019.

The results of stratospheric aerosol observations at lidar stations of Roshydromet after the explosive eruption of the Raikoke volcano (Kuril Islands, 48.29° N, 153.25° E) in June 2019 are presented. By using direct trajectory analysis and observational data of the Calipso satellite lidar the aerosol trace in the stratosphere is revealed from the volcano around the pole to Western Siberia within a month after the eruption. The lidar measurements of volcanic aerosol from the end of July 2019 at the Roshydromet lidar stations in Obninsk, Znamensk, Novosibirsk, and Petropavlovsk-Kamchatsky are presented. Volcanic aerosol was observed in the layer from 13 to 18 km. The integral backscattering coefficient in the layer varied from the maximum $(0,8–1,6) \cdot 10^{-3}$ sr $^{-1}$ in August–September 2019 to $(0,2–0,3) \cdot 10^{-3}$ sr $^{-1}$ by the end of the year.