

Наблюдения стратосферного аэрозоля на лидарных станциях Росгидромета в 2022 г. после извержения подводного вулкана Хунга-Тонга в январе 2022 г.

В.Н. Иванов¹, В.С. Гребенников², В.А. Коршунов^{✉1}, Д.Г. Сахибгареев^{1*}

¹НПО «Тайфун»

249038, г. Обнинск, Калужская обл., ул. Победы, 4

²Центральная аэрокосмическая обсерватория

141700, г. Долгопрудный, Московская обл., ул. Первомайская, 3

Поступила в редакцию 14.02.2023 г.;

после доработки 23.03.2023 г.;

принята к печати 27.03.2023 г.

Представлены результаты наблюдения аэрозольных слоев в стратосфере на лидарных станциях Росгидромета в Санкт-Петербурге (59,9° с.ш.), Обнинске (55,1° с.ш.) и Знаменске (48,6° с.ш.) через несколько месяцев после извержения в январе 2022 г. подводного вулкана Хунга-Тонга (21° ю.ш., 175° з.д.). В апреле, мае и октябре наблюдались аэрозольные слои на высотах от 20 до 24 км с отношением обратного рассеяния от 1,2 до 1,4. Степень деполяризации на длине волны 532 нм и отношение коэффициентов обратного аэрозольного рассеяния на длинах волн 355 и 532 нм показывают, что аэрозоль представлен сферическими субмикронными частицами. Проведено сопоставление результатов наблюдений с известными литературными данными по распространению аэрозоля вулкана Хунга-Тонга.

Ключевые слова: стратосферный аэрозоль, лидарное зондирование, вулкан Хунга-Тонга; stratospheric aerosol, lidar sensing, Hunga Tonga volcano.

Введение

Вулканический аэрозоль является одним из важных климатообразующих факторов. Крупные вулканические извержения с выбросом серы в стратосферу в несколько мегатонн могут приводить к понижению приземной температуры в отдельных регионах Земли на 0,1°.

15 января 2022 г. произошло извержение подводного вулкана Хунга-Тонга (20,57° ю.ш., 175,38° з.д.) [1]. Во многих отношениях это явление было беспрецедентным. В частности, наблюдалась мощная ударная волна, два раза обошедшая вокруг земного шара, а также интенсивные инфразвуковые и сейсмические волны. Выброс вулканом SO₂ был не столь значительным, около 0,4 Мт, но в стратосферу было вброшено около 140 Мт водяного пара, что составляет примерно 10% общего содержания водяного пара в стратосфере. Максимальная высота выброса по данным спутникового

лидара CALIOP — 35–40 км [2], а по данным триангуляционных измерений выброс достиг мезосферных высот [3].

Распространение водяного пара и аэрозоля происходило первоначально в Южном полушарии, но уже к марту аэрозоль проник в тропики и затем в Северное полушарие [2]. Согласно данным спутниковых измерений OMPS-LP [2] с задержкой около 2,5 мес. после извержения (т.е. с апреля 2022 г.) аэрозоль появился в средних и высоких широтах Северного полушария на высотах ~ (20 ÷ 24 км) и ~ (10 ÷ 15 км). Указанные диапазоны высот соответствуют распространению аэрозоля по верхней и нижней ветвям циркуляции Брюера–Добсона [2]. В отдельных эпизодах аэрозоль в виде тонких слоев был зарегистрирован рядом лидарных станций Северного полушария, в частности 28.04.2022 г. в Kuhlungsborn, Germany (54° с.ш.), 1.06.2022 г. в Andoya, Norway (69° с.ш.) и 3.06.2022 г. в OHP, France (44° с.ш.) [2].

Цель данной работы — проанализировать результаты наблюдений аэрозольных слоев в стратосфере, инициированных извержением вулкана Хунга-Тонга, на лидарных станциях Росгидромета в Санкт-Петербурге (59,9° с.ш.), Обнинске (55,1° с.ш.) и Знаменске (48,6° с.ш.).

* Владимир Николаевич Иванов (vivanov@rpatyphoon.ru); Виктор Сергеевич Гребенников (greb_v_s_1952@mail.ru); Владимир Алексеевич Коршунов (korshunov@rpatyphoon.ru); Джаиль Габбасович Сахибгареев (dg@rpatyphoon.ru).

Результаты наблюдений и их обсуждение

Измерения проводились с помощью лидара АК-3 в ночное время при безоблачной атмосфере на длинах волн 532 (две поляризации) и 355 нм. Описание лидара и методики измерений можно найти в [4]. В Обнинске и Знаменске измерения проводились на регулярной основе, в Санкт-Петербурге — эпизодически. По данным измерений рассчитывались

высотные профили величины $R - 1$, где R — отношение обратного рассеяния. Параметр $R - 1$ численно равен отношению коэффициентов обратного аэрозольного и молекулярного рассеяния и характеризует относительное содержание аэрозоля в стратосфере. Результаты измерений на длине волны 532 нм представлены на рис. 1. На высотах 22 и 24 км видны тонкие аэрозольные слои. С учетом усреднения сигналов по высоте толщина слоев на уровне половины от максимума составляет около 0,5 км.

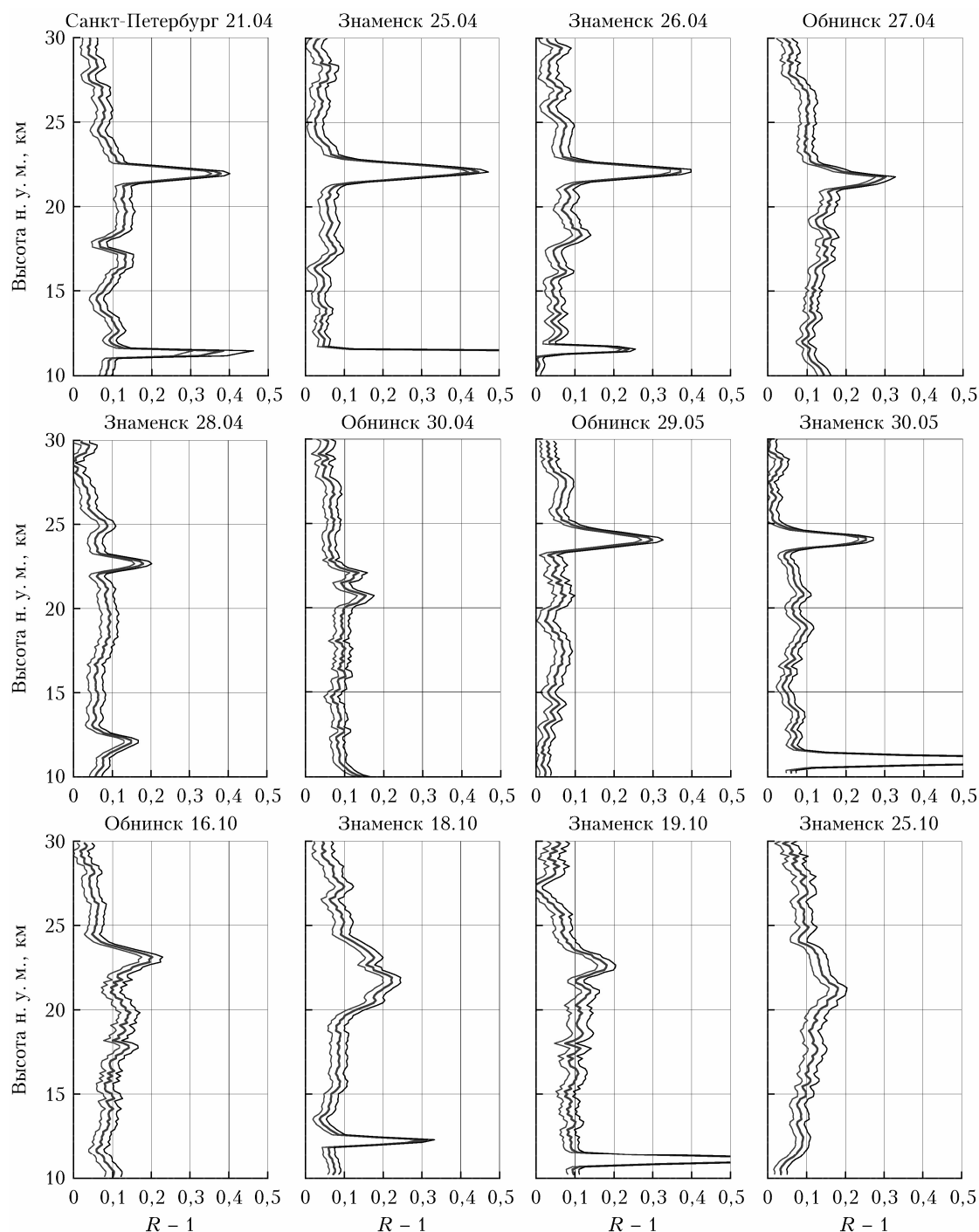


Рис. 1 Высотные профили параметра $R - 1$ (полужирные кривые) по измерениям на лидарных станциях Росгидромета в 2022 г. Тонкие кривые — коридор погрешностей

Первый случай наблюдения (рис. 1) относится к концу апреля. Слои на высоте 22 км были зафиксированы 21.04 в Санкт-Петербурге, затем 25.04, 26.04 и 28.04 — в Знаменске и 27.04 — в Обнинске. Отметим, что в этот же период аэрозольный слой наблюдался и в Kuhlungsborn, Germany [2].

Вторично слои появились в конце мая — начале июня: 29.05 в Обнинске, 30.05 в Знаменске, на этот раз на высоте 24 км. Вместе со случаями измерений 1.06 в Andoya и 3.06 в ОНР [2] все эти наблюдения можно отнести к одному эпизоду. После длительного перерыва подобный, хотя и ослабленный, слой был снова зарегистрирован в Обнинске и Знаменске в октябре 2022 г.

Степень деполяризации обратного рассеяния в наблюдавшихся слоях составляла $0,02 \pm 0,01$ и в пределах погрешности не отличалась от степени деполяризации в окружающем фоновом аэрозоле. Это означает, что слои образованы сферическими частицами, которые, по-видимому, представляют обычные для стратосферы капли водного раствора серной кислоты. Одновременно в районе тропопаузы на высоте около 12 км наблюдались слои с деполяризацией обратного рассеяния, характерной для перистых облаков [5, 6]. В двух случаях (26.04 и 28.04 в Знаменске) деполяризация находилась на уровне фонового аэрозоля. В принципе, возможны два варианта объяснения деполяризации для этих слоев: либо это был сферический аэрозоль, либо кристаллические перистые облака с горизонтально ориентированными частицами. Но в последнем случае обычно наблюдается аномально высокое обратное рассеяние [7], чего в измерениях 26.04 и 28.04 не отмечалось. Поэтому более вероятно, что эти слои образованы сферическими частицами. В [2] приводятся данные спутниковых измерений, показывающие, что распространение аэрозоля вулкана Хунга-Тонга в Северное полушарие происходило также и по нижней ветви циркуляции Брюера-Добсона на уровне нескольких километров над тропопаузой. В этой связи можно предположить, что наблюдавшиеся в наших измерениях нижние слои также связаны с извержением Хунга-Тонга.

Отношение коэффициентов обратного рассеяния R_β на длинах волн 355 и 532 нм в точке максимума обратного рассеяния в слое менялось в довольно широких пределах: от 1,0 до 2,2. Расчеты, проведенные нами с учетом известных эмпирических спектров частиц сернокислотного аэрозоля [5], показывают, что при $R_\beta = 1$ характерный радиус частиц r_{32} (32 — отношения третьего момента спектра частиц ко второму) может меняться от 0,4 до 0,7 мкм, а при $R_\beta = 2$ — от 0,08 до 0,5 мкм. Отсюда следует, что частицы аэрозоля в наблюдавшихся слоях относились к субмикронному диапазону, но при этом в ряде случаев были заметно крупнее по сравнению с частицами фонового сернокислотного аэрозоля ($r_{32} \sim 0,1\text{--}0,2$ мкм).

Для оценки изменения среднего аэрозольного содержания стратосферы после извержения Хунга-Тонга проведено сравнение результатов измерений

весной 2022 г. с данными за предыдущие годы. Сопоставление высотных профилей за март, апрель и май 2022 и 2021 гг. в Обнинске и Знаменске показало, что заметное увеличение содержания аэрозоля в 2022 г. произошло в слое 18–24 км в марте и апреле. Поэтому для этого периода был проведен расчет интегрального содержания аэрозоля в более широком временном диапазоне. На рис. 2 показан временной ход интегрального коэффициента обратного рассеяния B_π (ср^{-1}) в слое от 18 до 24 км в Обнинске для марта с 2012 г. Среднее число измерений за месяц составляло около десяти. Поскольку перенос аэрозоля из тропиков зависит от фазы квазидвухлетних колебаний экваториального ветра (КДК), в нижней части рис. 2 обозначена фаза КДК для марта соответствующего года (кроме тех лет, когда в марте происходил переход от одной фазы к другой).

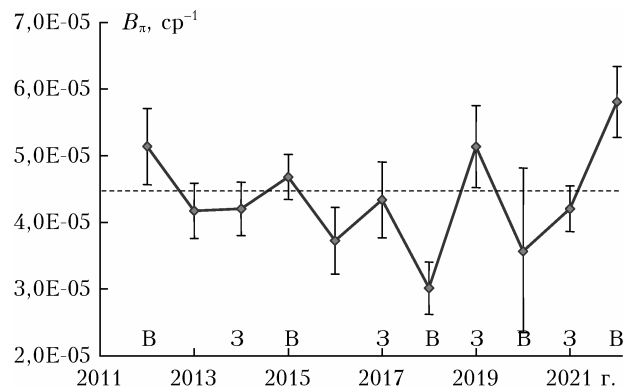


Рис. 2. Изменение средней за март интегральной величины коэффициента обратного рассеяния в слое 18–24 км с 2012 по 2022 г. над Обнинском. Вертикальные отрезки показывают среднеквадратические отклонения от среднемесячных значений; штриховая линия представляет среднюю за представленный период величину коэффициента обратного рассеяния; В — восточная, З — западная фазы КДК

Из рис. 2 виден максимум B_π в 2012 г., связанный с извержениями вулканов Набро и Гримсвотен в 2011 г. После 2012 г. содержание аэрозоля постепенно уменьшалось в данном слое до 2018 г. Как следует из рис. 2, в большинстве случаев при восточной фазе КДК наблюдалось меньшее содержание аэрозоля, чем при западной. С 2017 по 2021 г. заметно четкое чередование: в восточной фазе B_π меньше, чем в западной. Однако в 2022 г. произошел подъем B_π несмотря на восточную фазу КДК. Увеличение B_π по сравнению со средним за 2012–2019 гг. значением составляет около 30%. С учетом представленных выше литературных данных есть достаточные основания полагать, что это увеличение связано с переносом аэрозоля вулкана Хунга-Тонга из тропической зоны.

Подобный график изменения B_π в марте, хотя и для меньшего временного интервала, представлен на рис. 3 для лидарной станции Знаменск. Из рис. 3 видно, что в Знаменске также имел место рост B_π в 2022 г. по сравнению с 2020–2021 гг.

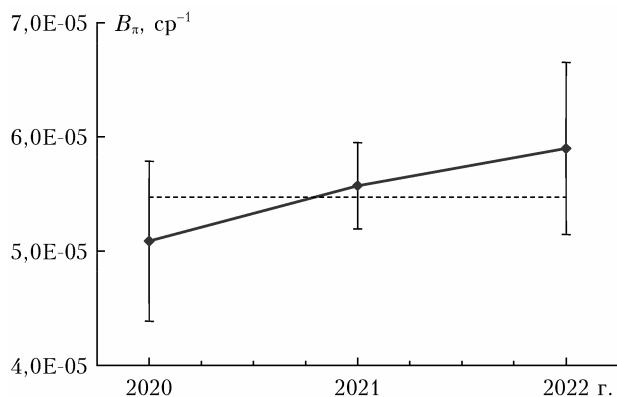


Рис. 3. Изменение средней за март интегральной величины коэффициента обратного рассеяния в слое 18–24 км с 2020 по 2022 г. над г. Знаменском (обозначения см. на рис. 2)

Расчеты, проведенные для апреля, показывают сходные результаты. В частности, в Обнинске произошло увеличение B_{π} на 20% по сравнению с периодом 2012–2019 гг.

Проведем оценки оптической толщины τ стратосферного аэрозоля вулкана Хунга-Тонга над Обнинском. Обычно в этом случае рассматривается интервал высот от 15 до 30 км. Оптическая толщина $\tau = B_{\pi} \chi$, где χ — лидарное отношение. В марте 2022 г. в слое 15–30 км $B_{\pi} = 1,3 \cdot 10^{-4} \text{ sr}^{-1}$. Взяв характерное для стратосферного аэрозоля $\chi = 50 \text{ sr}$ [8, 9], получим $\tau = 6,5 \cdot 10^{-3}$. По сравнению со средним значением за 2014–2021 гг. ($\tau = 4,55 \cdot 10^{-3}$) в марте величина τ увеличилась в 1,4 раза. Согласно [2] в результате извержения средняя оптическая толщина аэрозольного слоя стратосферы в широтном поясе от 60° ю.ш. до 60° с.ш. возросла до $\sim 0,02$. Отсюда видно, что измерения над Обнинском дают в несколько раз меньшие значения оптической толщины аэрозольного слоя. Это означает, что основная доля аэрозоля, инициированного извержением Хунга-Тонга, в марте 2022 г. оставалась сосредоточенной в Южном полушарии и тропическом поясе.

Представляет интерес вопрос о механизме формирования тонких слоев аэрозоля при его переносе из тропической зоны в средние широты. В принципе, такого рода явления не редки в средней атмосфере. Причины структурирования примесей при их переносе из тропиков рассматривались, в частности, в работе [10]. Известно, что вихревое перемешивание, возникающее в так называемой «зоне прибоя» и являющееся основным механизмом переноса примесей из тропиков в средние широты, возникает при разрушении волн Россби и сопровождается образованием вытянутых горизонтальных структур в поле примесей (филаментация). Одновременно в результате вертикальных неоднородностей в поле ветра возникает и расслоение по высоте, что приводит к слоистой структуре аэрозоля. Летом перемешивание осуществляется также синоптическими волнами и высота «зоны прибоя» может достигать 25 км [11].

Анализ данных по переносу аэрозоля вулкана Хунга-Тонга показывает, что имеется определенная

аналогия с процессом распространения аэрозоля в результате извержения вулкана Пинатубо в 1991 г. В начальный период после извержения Пинатубо также отмечалась восточная фаза КДК. Через месяц после извержения на японской лидарной сети наблюдался изолированный аэрозольный слой на высоте 22 км, постепенно к нему добавились слои на меньших высотах [12]. С задержкой около полугода аэрозоль вулкана Пинатубо распространился на средние широты Северного полушария. Первоначально максимальные по оптической плотности слои наблюдались в Обнинске [13], Томске [14], NOAA Fritz Peak Observatory (39,9° с.ш., 105,3° з.д.) [15] и в Hampton, Virginia (37,03° с.ш., 76,35° з.д.) [16], как правило, на высотах 21–23 км. В этой связи отметим, что уровень 22 км является в определенном смысле «выделенным», поскольку он близок к нижней границе тропического резервуара аэрозоля, формируемого при восходящих движениях в восточной фазе КДК [10, 17].

Особенностью переноса аэрозоля вулкана Хунга-Тонга является его быстрое распространение в Северном полушарии. Это, по-видимому, связано с активизацией процессов переноса аэрозоля в зимнее время в ходе сезонного цикла циркуляции Брюера–Добсона [11].

Заключение

Результаты измерений стратосферного аэрозоля на лидарных станциях Росгидромета показали, что перенос аэрозоля, инициированного извержением подводного вулкана Хунга-Тонга, из Южного полушария проявился на европейской территории России двояким образом: в виде нескольких случаев появления тонких слоев повышенного обратного рассеяния в апреле, мае и октябре 2022 г. и в виде увеличения на десятки процентов среднего аэрозольного содержания в слое 18–24 км весной по сравнению с предыдущим периодом с 2012 г. Полученные результаты согласуются с данными лидарных наблюдений, проведенных на средне- и высокоширотных европейских станциях в апреле–июне 2022 г.

В дальнейшем планируется продолжить исследование влияния извержения Хунга-Тонга на аэрозольное содержание стратосферы.

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке Росгидромета (тема 6.1. «Развитие и модернизация технологий мониторинга геофизической обстановки над территорией Российской Федерации и Арктики»).

Список литературы

1. Sellitto P., Podglajen A., Belhadji R., Boichu M., Carboni E., Cuesta J., Duchamp C., Kloss C., Siddans R., Begue N., Blarel L., Jegou F., Khaykin S., Renard J.-B., Legras B. The unexpected radiative impact of the Hunga Tonga eruption of January 15th, 2022 // Commun. Earth Environ. DOI: 10.21203/rs.3.rs-1562573/v1, 2022.

2. *Khaykin S., Podglajen A., Ploeger A., Grooß J.-U., Tence F., Bekki S., Khlopenkov K., Bedka K., Rieger L., Baron A., Godin-Beekmann S., Legras B., Selitto P., Sakai T., Barnes J., Uchino O., Morino I., Naga T., Wing R., Baumgarten G., Gerding M., Duflo V., Payen G., Jumelet J., Querel R., Liley B., Bourassa A., Hauchecorne A., Ravetta F., Clouser B., Feofilov A.* Global perturbation of stratospheric water and aerosol burden by Hunga eruption // *Commun. Earth Environ.* DOI: 10.21203/rs.3.rs-1864748/v1/.
3. *Carr J.L., Horváth Á., Wu D.L., Friberg M.D.* Stereo plume height and motion retrievals for the record-setting Hunga Tonga-Hunga Ha'apai eruption of 15 January 2022 // *Geophys. Res. Lett.* 2022. V. 49. e2022GL098131. DOI: 10.1029/2022 GL098131.
4. *Иванов В.Н., Зубачев Д.С., Коршунов В.А., Сахибгареев Д.Г.* Сетевой лидар АК-3 для зондирования средней атмосферы: устройство, методы измерений, результаты // *Тр. ГГО.* 2020. Вып. 598. С. 155–187.
5. *Borovoi A., Konoshonkin A., Kustova N.* Backscattering by hexagonal ice crystals of cirrus clouds // *Opt. Lett.* 2013. V. 38, N 15. P. 2881–2884.
6. *Wang Z., Шишко В.А., Коношонкин А.В., Кустова Н.В., Боровой А.Г., Матвиенко Г.Г., Xie C., Liu D., Wang Y.* Исследование перистых облаков поляризационным лидаром в юго-восточном Китае (г. Хефэй) // *Оптика атмосф. и океана.* 2016. Т. 29, № 12. С. 1050–1052; *Wang Zhenzhu, Shishko V.A., Konoshonkin A.V., Kustova N.V., Borovoi A.G., Matvienko G.G., Xie Chenbo, Liu Dong, Wang Yingjian.* The study of cirrus clouds with the polarization lidar in the South-East China (Hefei) // *Atmos. Ocean. Opt.* 2017. V. 30, N 3. P. 234–235.
7. *Коханенко Г.П., Балин Ю.С., Боровой А.Г., Новоселов М.М.* Исследования ориентации кристаллических частиц в ледяных облаках сканирующим лидаром // *Оптика атмосф. и океана.* 2022. Т. 35, № 4. С. 319–325; *Kokhanenko G.P., Balin Yu.S., Borovoi A.G., Novoselov M.M.* Studies of the orientation of crystalline particles in ice clouds by a scanning lidar // *Atmos. Ocean. Opt.* 2022. V. 35, N 5. P. 509–516.
8. *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.
9. *Jäger H., Deshler T.* Correction to “Lidar backscatter to extinction, mass and area conversions for stratospheric aerosols based on midlatitude balloonborne size distribution measurements” // *Geophys. Res. Lett.* 2003. V. 30, N 7. P. 1382. DOI: 10.1029/2003GL017189.
10. *Shepherd T.G.* Transport in the middle atmosphere // *J. Meteor. Soc. Japan.* 2007. V. 85B. P. 165–191.
11. *Plumb R.A.* Tracer interrelations in the stratosphere // *Rev. Geophys.* 2007. V. 45. RG4005. DOI: 10.1029/2005RG000179.
12. *Uchino O., Nagai T., Fujimoto T., Fujiwara M., Akiyoshi H., Yasumatsu S., Hayashida S., Sasano Y., Nakane H., Shibata T., Itabe T., Asai K., Nomura A., Saito Y., Kano T. Sai Y., Tamaki K., Nomura R., Sunagawa T., Nagasawa C., Abo M., Idesako Y., Kai K.* Observation of the Pinatubo volcanic cloud by lidar network in Japan // *J. Met. Soc. Japan.* 1993. V. 71. P. 285–295.
13. *Хмелевцов С.С., 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: Сб. статей.* СПб.: Гидрометеоиздат, 1998. С. 358–392.
14. *Зуев В.В.* Лидарный контроль стратосферы. Новосибирск: Наука, 2004. 306 с.
15. *Langford A.O., O’Leary T.J., Proffitt M.H.* Transport of the Pinatubo volcanic aerosol to a northern midlatitude site // *J. Geophys. Res.* 1995. V. 100, N D5. P. 9007–9016.
16. *Osborn M.T., DeCoursey R.J., Trepte C.R., Winker D.M., Woods D.C.* Evolution of the Pinatubo volcanic cloud over Hampton, Virginia // *Geophys. Res. Lett.* 1995. V. 22, N 9. P. 1101–1104.
17. *Hitchman M., McKay M., Trepte C.R.* A climatology of stratospheric aerosol // *J. Geophys. Res.* 1994. V. 99. P. 20,689–20,700.97.

V.N. Ivanov, V.S. Grebennikov, V.A. Korshunov, D.G. Sakhibgariev. Observations of stratosphere aerosol at lidar stations of Roshydromet after the eruption of the submarine Hunga Tonga volcano in January 2022.

The observations of stratospheric aerosol layers at the lidar stations of Roshydromet in Sankt-Peterburg (59.9° N), Obninsk (55.1° N), and Znamensk (48.6° N) some months after the explosive eruption of the submarine Hunga Tonga (21° S, 175° W) volcano in January 2022 are presented. Aerosol layers at 20–24 km altitudes are observed in April, May, and October with a backscattering ratio of 1.2–1.4. The degree of depolarization at 532 nm and the ratio of the backscattering coefficients at 355 and 532 nm wavelengths show that aerosol consists of submicron spherical particles. The observation results are compared with known data on Hunga Tonga aerosol propagation.