

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 551.51

Активность высоких циклонов над вулканом Эребус по данным реанализа ERA5

Э.А. Масленникова[✉], В.В. Зуев, Е.С. Савельева, А.В. Павлинский*

*Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН
634055, г. Томск, пр. Академический, 10/3*

Поступила в редакцию 19.03.2024;
после доработки 17.05.2024;
принята к печати 21.05.2024

Вулкан Эребус является самым южным действующим вулканом на Земле, в состав выбросов которого входят соединения, играющие существенную роль в каталитических циклах разрушения стратосферного озона. Высокие циклоны способствуют подъему газовых выбросов вулкана Эребус (включая HCl и SO₂) из тропосферы в высотный диапазон формирования озоновой дыры от 14 до 22 км. Рассмотрено интегральное содержание HCl и ClONO₂ за 1992–2023 гг. над разными станциями, а также проведен анализ изменчивости частоты появления высоких циклонов над вулканом Эребус за 1980–2022 гг. по данным реанализа ERA5. Выявлено, что максимальная частота появления высоких циклонов над вулканом Эребус, как правило, наблюдается в июле. Анализ интегрального содержания HCl на разных станциях показал, что значения над Антарктикой значительно превышают таковые над Арктикой, а также почти в два раза выше, чем на станциях, расположенных в средних широтах. Показан предполагаемый эффект накопления HCl в стратосфере: коэффициент корреляции между пятилетними средними значениями частоты появления высоких циклонов и площади озоновой дыры с временным сдвигом ряда на четыре года вперед относительно ряда частоты появления высоких циклонов, рассчитанный с 1980 по 2022 г., составил 0,78. Полученные результаты могут быть использованы для более точного прогнозирования и моделирования изменений в атмосфере, связанных с деятельностью вулканов.

Ключевые слова: высокие циклоны, антарктические озоновые дыры, вулкан Эребус, антарктический полярный вихрь; high cyclones, Antarctic ozone hole, Erebus volcano, Antarctic polar vortex.

Впервые об озоновой аномалии стало известно еще в конце 1950-х гг. [1], однако проблема образующихся областей с низким содержанием озона в полярных широтах актуальна и в настоящее время. При разрушении стратосферного полярного вихря происходит перемешивание воздуха со среднеширотными воздушными массами, что может временно понижать содержание озона в средних широтах [2]. Одной из причин возникновения ежегодных озоновых аномалий над Антарктикой является образование полярных стратосферных облаков (ПСО), в которых в качестве ядер конденсации выступает сернокислотный аэрозоль. Образование ПСО становится возможным при выхолаживании стратосферы внутри вихря до температуры ниже –78 °C. Переход хлора из своих резервуаров (HCl и ClONO₂) в фотохимически активный молекулярный хлор Cl₂ происходит при протекании гетерогенных реакций на поверхности ПСО, а с появлением солнечного излучения запускается хлорный цикл разрушения озона.

Обогащение поверхности ПСО значительным количеством хлороводорода HCl обусловлено существованием в Антарктиде мощного вулканогенного источника. Вулкан Эребус, расположенный на острове Росса (77,5° ю.ш., 167,2° в.д.; высота – 3794 м), – один из постоянно действующих вулканов на Земле и наиболее явный источник значительного количества HCl в антарктической стратосфере. Ежегодно он выбрасывает в атмосферу значительное количество HCl и SO₂. Как известно, вулканические газы во время дегазации достигают высоты примерно 1–2 км над жерлом вулкана и, следовательно, не попадают напрямую в стратосферу [3–5]. Вследствие постоянной пассивной и взрывной дегазации вулкана Эребус [6–8] HCl и другие газовые выбросы попадают в тропосферу, затем переносятся в стратосферу восходящими циклональными потоками воздуха в течение всего года. Подобный перенос возможен, если нижняя граница высокого циклона находится над вершиной вулкана Эребус (~ 4 км), а верхняя достигает высоты нижней стратосферы (~ 10 км), где встраивается в антарктический полярный вихрь [9].

Как известно, гетерогенные реакции на поверхности ПСО протекают при взаимодействии хлороводорода HCl и хлорнитрата ClONO₂ с последующим

* Эрика Александровна Масленникова (maslennikova-erika@gmail.com); Владимир Владимирович Зуев (vzuev@list.ru); Екатерина Сергеевна Савельева (esav.pv@gmail.com); Алексей Валерьевич Павлинский (wf@inbox.ru).

высвобождением фотохимически активного молекулярного хлора Cl_2 [10]. На рис. 1 приведены среднemesячные значения интегрального содержания HCl и ClONO_2 на четырех средне- и высокоширотных станциях в Северном (Jungfraujoch, Ny-Alesund) и Южном (Lauder, Arrival Heights) полушариях, полученные по данным NOAA's National Weather Service Network for the Detection of Atmospheric Composition Change (NDACC, <http://www.ndsc.ncep.noaa.gov>) с 1992 по 2023 г.

Интегральное содержание ClONO_2 на всех станциях варьировалось примерно одинаково за рассматриваемый период. Однако интегральное содержание HCl на разных станциях различается. На станции Arrival Heights, расположенной в Антарктиде, наблюдаются значительно более высокие значения по сравнению с другими станциями. В среднем за 1992–2023 гг. интегральное содержание HCl на высокоширотных станциях Arrival Heights и Ny-Alesund составило $6,40 \cdot 10^{15}$ и $5,06 \cdot 10^{15}$ молек./см² соответственно, а на среднеширотных — Lauder и Jungfraujoch — $3,60 \cdot 10^{15}$ и $3,63 \cdot 10^{15}$ молек./см². Видно, что интегральное содержание HCl на станции Arrival Heights (Антарктика) выше в 1,8 раза, чем на станциях, расположенных в средних широтах (Lauder и Jungfraujoch), и выше в 1,3 раза, чем на станции, расположенной в Арктике (Ny-Alesund).

Высокое содержание HCl в атмосфере Антарктики, вероятнее всего, связано с дегазацией вулкана Эребус [9]. При участии высоких циклонов, которые встраиваются в антарктический полярный вихрь, HCl проникает из тропосферы в нижнюю стратосферу, что впоследствии может способствовать усилению разрушения озона при формировании озоновой дыры. Внутри высоких циклонов, как известно, происходит подъем воздушных масс в их передней и центральной частях и опускание —

в тыловой. Согласно оценкам [9], и опускание — в тыловой. Согласно оценкам [9], вероятность подъема воздушных масс в стратосферу посредством циклонов, проходящих над вулканом Эребус, составила 72%.

Для определения частоты появления высоких циклонов над вулканом Эребус в каждый месяц использовались поля геопотенциала по ежедневным данным реанализа ERA5 [11] за 1980–2022 гг. для уровней 600 и 250 гПа, соответствующих высотам вершины вулкана Эребус и нижней стратосфере. На основе анализа частоты появления высоких циклонов суммарно за месяц для каждого года были получены месяцы с наиболее высокими и низкими значениями, а также суммарная для каждого месяца частота появления высоких циклонов с 1980 по 2022 г. (рис. 2). Видно, что максимальная частота появления высоких циклонов над вулканом Эребус, как правило, наблюдается в июле, в то время как в августе и декабре не зафиксировано ни одного внутригодового максимума. Однако суммарная частота появления высоких циклонов в августе за 1980–2022 гг. составляет 106% от средней за все месяцы, что свидетельствует о ее незначительной межгодовой изменчивости в августе. Минимальная частота появления высоких циклонов в большинстве случаев наблюдается в декабре, при этом суммарная частота составляет 49% от средней, что свидетельствует о низкой вероятности появления высоких циклонов в этом месяце. В январе 2000, 2012 и 2021 гг. наблюдалась максимальная частота появления высоких циклонов над вулканом Эребус, что обусловлено высокой устойчивостью антарктического полярного вихря в конце весны и начале лета 1999, 2011 и 2020 гг. [12], которая, вероятно, способствовала усилению активности тропосферных высоких циклонов в январе.

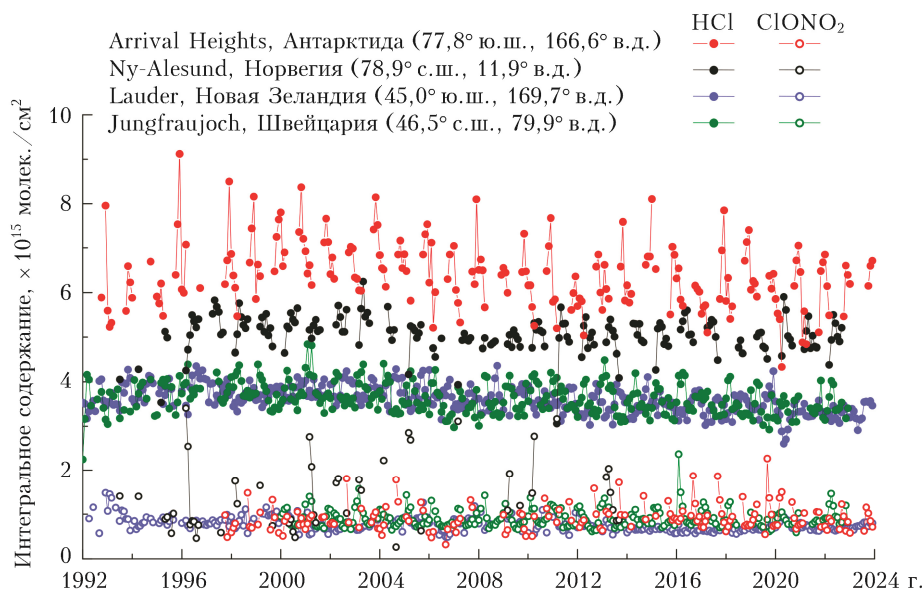


Рис. 1. Среднemesячное интегральное содержание HCl и ClONO_2 на станциях Arrival Heights, Ny-Alesund, Lauder и Jungfraujoch с 1992 по 2023 г. (см. цветные рис. 1–3 на сайте <http://iao.ru/ru/content/vol.37-2024/iss.07>)

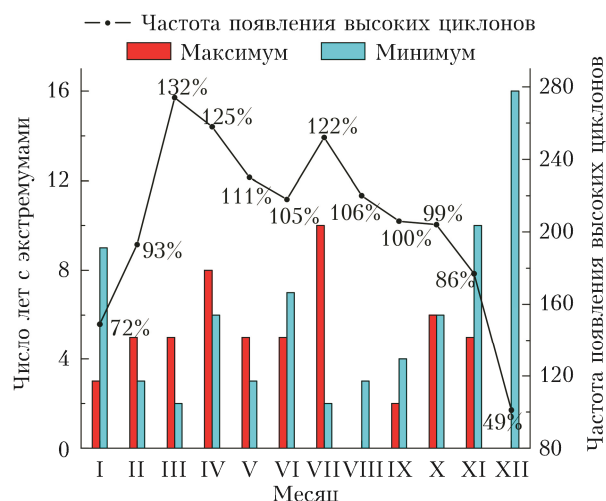


Рис. 2. Суммарная для каждого месяца частота появления высоких циклонов над вулканом Эребус, а также сумма лет для каждого месяца, когда частота появления циклонов в течение месяца была максимальной или минимальной по данным за год с 1980 по 2022 г.

Для оценки влияния частоты появления высоких циклонов на площадь озоновой дыры осуществлен корреляционный анализ данных за период с 1980 по 2022 г. Коэффициент корреляции рассчитывался между частотой появления высоких циклонов суммарно с мая по август (по данным реанализа ERA5) и усредненными с сентября по ноябрь значениями площади озоновой дыры (по данным NASA Goddard Space Flight Center) и составил 0,26. Вероятность P , характеризующая возможность наличия или отсутствия в генеральной совокупности связи между исследуемыми параметрами, составила 0,09 ($> 10^{-4}$), что указывает на отсутствие связи.

Основываясь на результатах, приведенных в работе [9], было предположено наличие эффекта накопления HCl в антарктической стратосфере. Коэффициент корреляции R между пятилетними средними частотой появления высоких циклонов и площадью озоновой дыры с временным сдвигом ряда на четыре года вперед относительно ряда частоты появления высоких циклонов, рассчитанный за период с 1980 по 2022 г., составил 0,78 при $P = 4,57 \cdot 10^{-8}$, что определяет высокую статистическую значимость полученных результатов (рис. 3). Таким образом, вероятно, проявляется эффект накопления HCl в антарктической стратосфере.

Таким образом, на основе данных NDACC показано, что интегральное содержание HCl на станции Arrival Heights (Антарктика) выше, чем на станциях, расположенных в средних широтах в 1,8 раза и превышает значения над Арктикой в 1,3 раза. Выявлено, что в большинстве случаев максимальная частота появления высоких циклонов над вулканом Эребус наблюдается в июле, в то время как в августе и декабре не зафиксировано ни одного внутригодового максимума за рассматриваемый

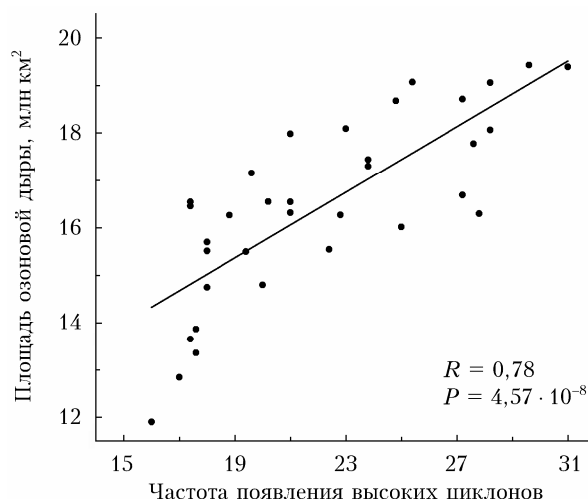


Рис. 3. Диаграмма рассеяния суммарной с мая по август частоты появления высоких циклонов и усредненных с сентября по ноябрь значений площади озоновой дыры для пятилетних средних значений при временном сдвиге на четыре года за 1980–2022 гг.

период, что обусловлено незначительной межгодовой изменчивостью частоты появления высоких циклонов в августе. Показан предполагаемый эффект накопления HCl в стратосфере, попадающего туда с восходящими потоками внутри высоких циклонов в результате активности вулкана Эребус. Коэффициент корреляции между пятилетними средними значениями частоты появления высоких циклонов и площадью озоновой дыры (с временным сдвигом на четыре года) составил 0,78.

Финансирование. Исследование выполнено в рамках госбюджетной темы № 121031300156-5.

Список литературы

1. Dobson G.M.B. Exploring the Atmosphere. Oxford: Clarendon Press, 1963. 209 p.
2. Solomon S., Garcia R.R., Rowland F.S., Wuebbles D.J. On the depletion of Antarctic ozone // Nature. 1986. V. 321, N 6072. P. 755–758. DOI: 10.1038/321755a0.
3. Boichu M., Oppenheimer C., Tsanev V., Kyle P.R. High temporal resolution SO₂ flux measurements at Erebus volcano, Antarctica // J. Volcanol. Geoth. Res. 2010. V. 190, N 3–4. P. 325–336. DOI: 10.1016/j.jvolgeores.2009.11.020.
4. Boichu M., Oppenheimer C., Roberts T.J., Tsanev V., Kyle P.R. On bromine, nitrogen oxides, and ozone depletion in the tropospheric plume of Erebus volcano (Antarctica) // Atmos. Environ. 2011. V. 45, N 23. P. 3856–3866. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2011.03.027.
5. Dibble R.R., Kyle P.R., Rowe C.A. Video and seismic observations of Strombolian eruptions at Erebus volcano, Antarctica // J. Volcanol. Geoth. Res. 2008. V. 177, N 3. P. 619–634. DOI: 10.1016/j.jvolgeores.2008.07.020.
6. Aster R., Mah S., Kyle P., McIntosh W., Dunbar N., Johnson J., Ruiz M., McNamara S. Very long period oscillations of Mount Erebus volcano // J. Geophys. Res. 2003. V. 108, N B11. P. 2522–2544. DOI: 10.1029/2002JB002101.

7. *Oppenheimer C., Moretti R., Kyle P.R., Eschenbacher A., Löwenstern J.B., Hervig R.L., Dunbar N.W.* Mantle to surface degassing of alkalic magmas at Erebus volcano // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2011. V. 306, N 3–4. P. 261–271. DOI: 10.1016/j.epsl.2011.04.005.
8. *Jones K.R., Johnson J.B., Aster R., Kyle P.R., McIntosh W.C.* Infrasonic tracking of large bubble bursts and ash venting at Erebus Volcano, Antarctica // *J. Volcanol. Geoth. Res.* 2008. V. 177, N 3. P. 661–672. DOI: 10.1016/j.jvolgeores.2008.02.001.
9. *Zuev V.V., Zueva N.E., Savelieva E.S., Gerasimov V.V.* The Antarctic ozone depletion caused by Erebus volcano gas emissions // *Atmos. Environ.* 2015. V. 122. P. 393–399. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2015.10.005.
10. *Krämer M., Müller R., Bovensmann H., Burrows J., Brinkmann J., Röth E.P., Groß J.U., Woyke T., Ruhne R., Günther G., Hendricks J., Lippert E., Carlslaw K.S., Peter T., Zieger A., Brühl C., Steil B., Lehmann R., McKenna D.S.* Intercomparison of stratospheric chemistry models under polar vortex conditions // *J. Atmos. Chem.* 2003. V. 45, N 1. P. 51–77. DOI: 10.1023/A:1024056026432.
11. *Hersbach H., Bell B., Berrisford P., Hirahara S., Horányi A., Muñoz-Sabater J., Nicolas J., Peubey C., Radu R., Schepers D., Simmons A., Soci C., Abdalla S., Abellan X., Balsamo G., Bechtold P., Biavati G., Bidlot J., Bonavita M., de Chiara G., Dahlgren P., Dee D., Diamantakis M., Dragani R., Flemming J., Forbes R., Fuentes M., Geer A., Haimberger L., Healy S., Hogan R.J., Hólm E., Janisková M., Keeley S., Laloyaux P., Lopez P., Lupu C., Radnoti G., de Rosnay P., Rozum I., Vamborg F., Villaume S., Thépaut J.N.* The ERA5 global reanalysis // *Q. J. Roy. Meteorol. Soc.* 2020. V. 146, N 730. P. 1999–2049. DOI: 10.1002/qj.3803.
12. *Zuev V.V., Savelieva E.S., Pavlinsky A.V., Sidorovski E.A.* The unprecedented duration of the 2020 ozone depletion in the Antarctic // *Dokl. Earth Sci.* 2023. V. 509, N 1. P. 166–170. DOI: 10.1134/S1028334X22601754.

E.A. Maslennikova, V.V. Zuev, E.S. Savelieva, A.V. Pavlinsky. Activity of high cyclones above Erebus volcano according to ERA5 reanalysis data.

Erebus volcano is the southernmost active volcano on Earth, whose volcanogenic emissions include components that play a significant role in catalytic cycles of stratospheric ozone depletion. High cyclones contribute to the rise of gas emissions from Erebus volcano (including HCl and SO₂) from the troposphere to the altitudinal range of ozone hole formation, from 14 to 22 km in the stratosphere. The paper considers the integral content of HCl and ClONO₂ for the period 1992–2023 and analyzes the variability of the frequency of high cyclone occurrence for the period 1980–2022 based on the ERA5 reanalysis data. It is revealed that the maximal frequency of occurrence of high cyclones over Erebus volcano is usually observed in July. The analysis of the integrated HCl content at different stations showed that the values over the Antarctic are much higher than over the Arctic and approximately twice as high as at midlatitude stations. The effect of HCl accumulation in the stratosphere is shown: the correlation coefficient between 5-year average frequencies of occurrence of high cyclones and 5-year average values of ozone hole area with a 4-year shift of the series of the ozone hole area ahead relative to the series of the frequency of occurrence of high cyclones, calculated for the period from 1980 to 2022, amounts 0.78.