

УДК 551.510.534

Исследование возможности влияния извержения вулкана Кальбуко на аномальное разрушение стратосферного озона над Антарктидой весной 2015 г.

В.В. Зуев^{1, 2}, Е.С. Савельева¹, Т.В. Парежева^{1*}

¹ *Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН
634055, г. Томск, пр. Академический, 10/3*

² *Национальный исследовательский Томский государственный университет
634050, г. Томск, пр. Ленина, 36*

Поступила в редакцию 27.03.2018 г.

Одна из крупнейших озоновых аномалий над Антарктидой наблюдалась в октябре–ноябре 2015 г. Увеличение озоновой дыры связывалось с извержением чилийского вулкана Кальбуко в апреле 2015 г. с максимальной высотой выброса продуктов ~17 км. С помощью реанализа ERA-Interim и траекторной модели NOAA HYSPLIT оценивается возможность проникновения вулканогенного аэрозоля в область полярного вихря. Показано, что вулканогенный аэрозоль не мог способствовать усилению реакций разрушения озона, поскольку находился за пределами устойчивого полярного вихря.

Ключевые слова: извержение вулкана Кальбуко, антарктическая озоновая дыра, южный полярный вихрь; Calbuco volcano eruption, Antarctic ozone hole, the southern polar vortex.

Введение

Стратосферные полярные вихри, формирующиеся в осенне-зимний период над Арктикой и Антарктикой, играют ключевую роль в образовании весенних озоновых аномалий [1–3]. В пределах вихря в условиях низких температур (менее –78 °С) на поверхностях полярных стратосферных облаков (ПСО) протекают гетерогенные реакции, обеспечивающие переход хлора из его неактивных форм (HCl, ClONO₂) в фотохимически активный молекулярный хлор (Cl₂) [4]. При сохранении устойчивого полярного вихря в начале весны, с появлением солнечного излучения над полярной областью запускается хлорный цикл разрушения озона. За счет денитрификации антарктической стратосферы при низких температурах активизируется реакция восстановления активного хлора при взаимодействии двух молекул ClO [5]. В течение всего периода существования полярного вихря в его пределах сохраняется изолированная область, характеризующаяся пониженным содержанием стратосферного озона. При этом временно прекращается обмен воздушными массами между полярной (внутри вихря) и субполярной областями [6–8].

Крупные вулканические извержения способны приводить к усилению весенних полярных озоновых аномалий [9–12]. Диоксид серы (SO₂), являющийся одним из основных вулканических газов,

попадая в стратосферу в результате извержения, в течение нескольких недель окисляется с образованием сернокислотного аэрозоля, который, в свою очередь, участвует в образовании ПСО [13]. Таким образом, повышение содержания сернокислотного аэрозоля может приводить к увеличению объема ПСО в зимне-весенний период над полярными областями [13] и, соответственно, к усилению весенних озоновых аномалий.

В ряде работ [14, 15] была рассмотрена роль извержения чилийского вулкана Кальбуко 22 апреля 2015 г. в увеличении числа ядер конденсации (сернокислотный аэрозоль) для образования частиц ПСО и усилении гетерогенных и фотохимических реакций разрушения озона весной 2015 г. Южный полярный вихрь формируется в апреле, когда зональная скорость ветра в районе 60° ю.ш. начинает превышать 15 м/с, постепенно блокируя воздухообмен между субполярной и полярной областями.

Цель статьи – исследование возможного попадания продуктов извержения вулкана Кальбуко внутрь полярного вихря в период формирования озоновой аномалии над Антарктидой весной 2015 г.

Аномальное разрушение стратосферного озона над Антарктидой в октябре–ноябре 2015 г.

Максимальные значения площади антарктической озоновой дыры (область, где общее содержание озона не превышает 220 ед. Д., южнее 40° ю.ш.),

* Владимир Владимирович Зуев (vvzuev@imces.ru); Екатерина Сергеевна Савельева (kapitosh89@gmail.com); Татьяна Владимировна Парежева (t.parezhewa@mail.ru).

как правило, регистрируются во второй половине сентября, после чего в течение последующих двух месяцев наблюдается ее постепенное затягивание, при котором реакции формирования озона начинают преобладать над реакциями его разрушения [16]. Однако в некоторые годы максимум площади озоновой дыры отмечался в октябре. В частности, в 2015 г. регистрировались anomalно высокие значения площади озоновой дыры с конца сентября по начало декабря, достигающие в октябре максимума ~28 млн км² [14]. На рис. 1 приведены временные изменения значений скорости зонального ветра на 60° ю.ш. и минимальной температуры в области 50–90° ю.ш. на высоте ~50 мбар (~19,6 км), объема ПСО в области 60–90° ю.ш. и площади антарктической озоновой дыры за 2015 г. в сравнении со

средними значениями за период 1979–2016 гг., полученными на основе данных NASA GSFC [17].

Как видно из рис. 1, скорость антарктического полярного вихря выходит за пределы среднеквадратичного отклонения ($\pm\sigma$) на протяжении октября и ноября 2015 г. (выделены затемненным прямоугольником) и даже превышает уровень 2σ с 20 по 30 октября. Повышенная скорость полярного вихря проявилась в пониженных значениях стратосферной температуры и, соответственно, высоких значениях объема ПСО и площади озоновой дыры в октябре и ноябре 2015 г. Динамика антарктического полярного вихря представлена на рис. 2 в виде среднемесячных полей скорости зонального ветра и температуры на высоте ~50 мбар за сентябрь, октябрь и ноябрь 2015 г. в сравнении со средними

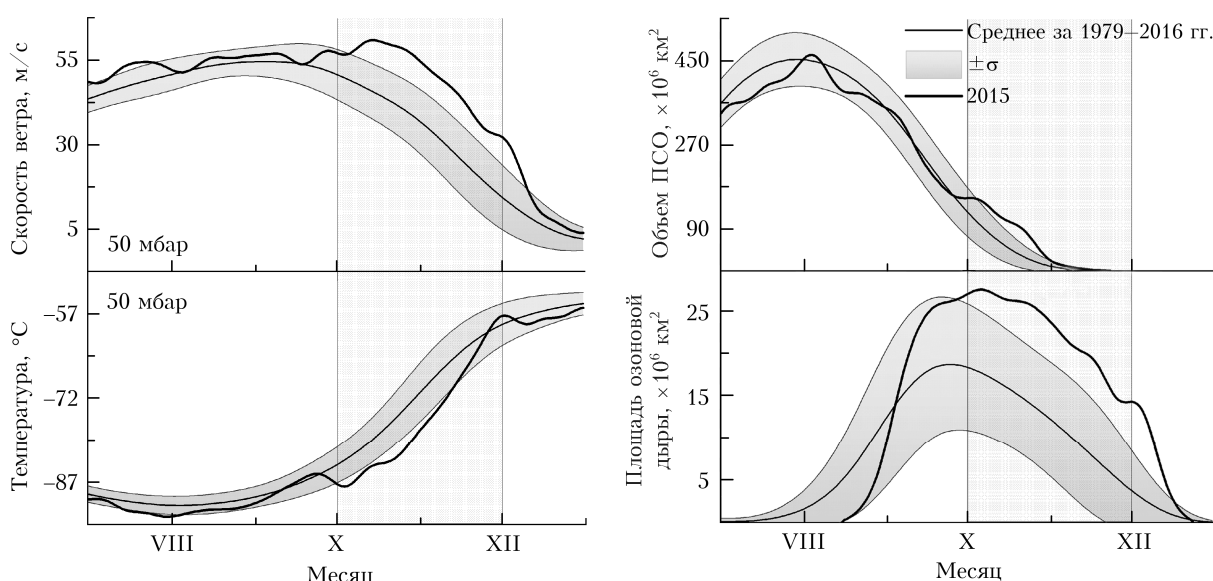


Рис. 1. Внутригодовые изменения значений скорости зонального ветра на 60° ю.ш. и минимальной температуры в области 50–90° ю.ш. на высоте ~50 мбар, объема ПСО в области 60–90° ю.ш. и площади антарктической озоновой дыры за 2015 г. в сравнении с климатической нормой ($\pm\sigma$), полученной за период 1979–2016 гг.

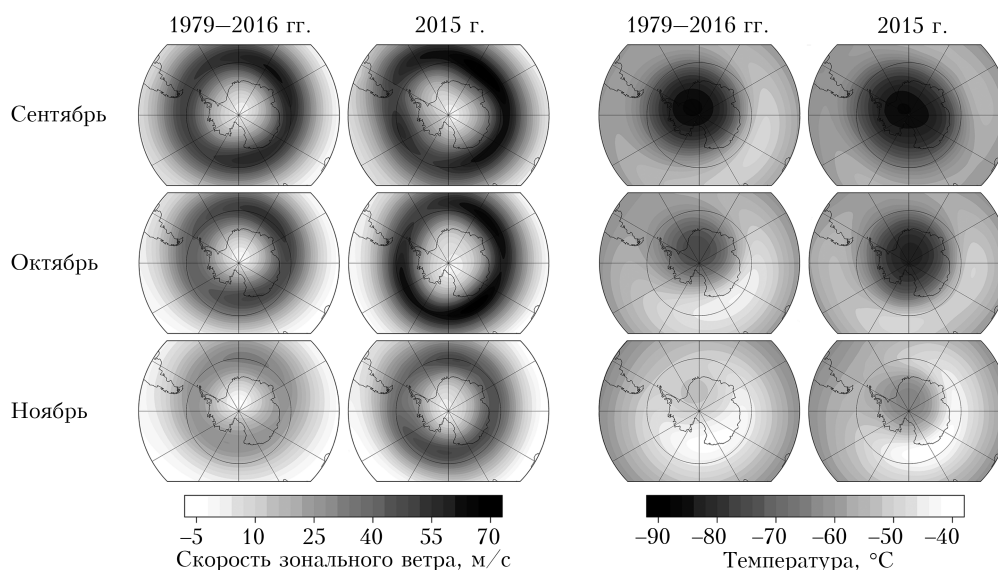


Рис. 2. Среднемесячные поля скорости зонального ветра и температуры на высоте ~50 мбар за сентябрь, октябрь и ноябрь в среднем за 1979–2016 гг. и за 2015 г.

значениями за 1979–2016 гг., полученных по данным реанализа ERA-Interim [18].

Антарктический полярный вихрь обычно достигает максимальной скорости в сентябре, после чего постепенно замедляется и его площадь сокращается в течение октября и ноября, что проявляется в средних за 38 лет значениях (см. рис. 2). При этом, как видно по областям низких температур, в октябре и ноябре наблюдается небольшое смещение вихря относительно полюса. В свою очередь, в 2015 г. на фоне достаточно высоких значений скорости полярного вихря в сентябре, в октябре регистрировалось его дополнительное ускорение с едва заметным уменьшением площади, при этом устойчивость вихря проявляется в его центрированном положении относительно полюса. Несмотря на замедление полярного вихря в ноябре 2015 г., его скорости заметно выше средних за 38 лет наблюдений, что проявилось и в более низких температурах внутри вихря.

Следовательно, можно сделать вывод о том, что динамический фактор развития озоновой дыры весной 2015 г., а именно поведение полярного вихря в октябре и ноябре, мог стать основной причиной аномального разрушения стратосферного озона над Антарктидой в этот период.

Траекторный анализ переноса продуктов извержения вулкана Кальбуко в стратосфере

Извержение чилийского вулкана Кальбуко (41,3° ю.ш., 72,6° з.д.) произошло 22 апреля 2015 г. в 21:04 (UTC) с высотой выброса продуктов около 17 км [19]. Время жизни вулканогенного аэрозоля в стратосфере после извержения можно оценить по скорости его осаждения. Для расчета скорости гравитационного осаждения частиц пепла и сернокислотного аэрозоля в стратосфере с высоты 17 км использовалась формула [20]:

$$u = \frac{2\sqrt{\pi}r\rho g \sqrt{\frac{2RT}{M}}}{(8 + \pi)P \frac{Kn}{Kn + 0,619} \left(1 + \frac{0,310Kn}{Kn^2 + 1,152Kn + 0,785}\right)}, \quad (1)$$

где r – радиус частиц; ρ – плотность частиц; g – ускорение свободного падения; R – универсальная газовая постоянная; T – температура на заданной высоте; M – молярная масса воздуха; P – давление на заданной высоте; Kn – число Кнудсена ($Kn = l/r$, l – средняя длина свободного пробега молекул воздуха). Для частиц пепла использовались значения радиуса $r = 1$ мкм и плотности $\rho = 1$ и $3,3$ г/см³ [19]. Для сернокислотного аэрозоля использовались значения радиуса $r = 0,35$ и $0,5$ мкм [19], значение плотности 75%-го водного раствора серной кислоты в стратосфере $\rho = 1,735$ г/см³ определялось по справочным данным [21]. На рис. 3 приведены линии седиментации частиц пепла и сернокислотного аэрозоля после извержения вулкана

Кальбуко с высоты 17 км. Согласно грубым оценкам основная часть вулканогенного аэрозоля была выведена из стратосферы еще до сентября 2015 г., т.е. в течение четырех месяцев после извержения, при этом наиболее тяжелые частицы пепла выпали из стратосферы в течение первых двух месяцев.

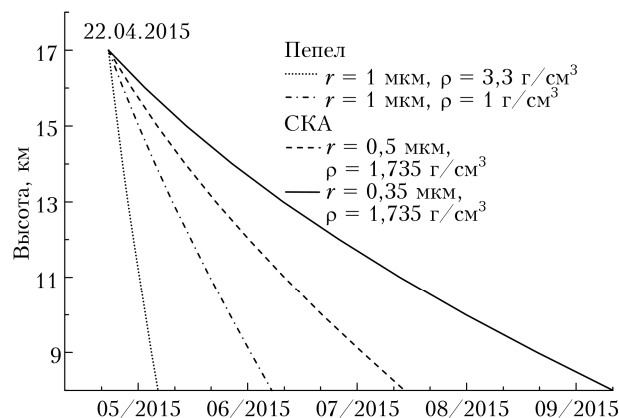
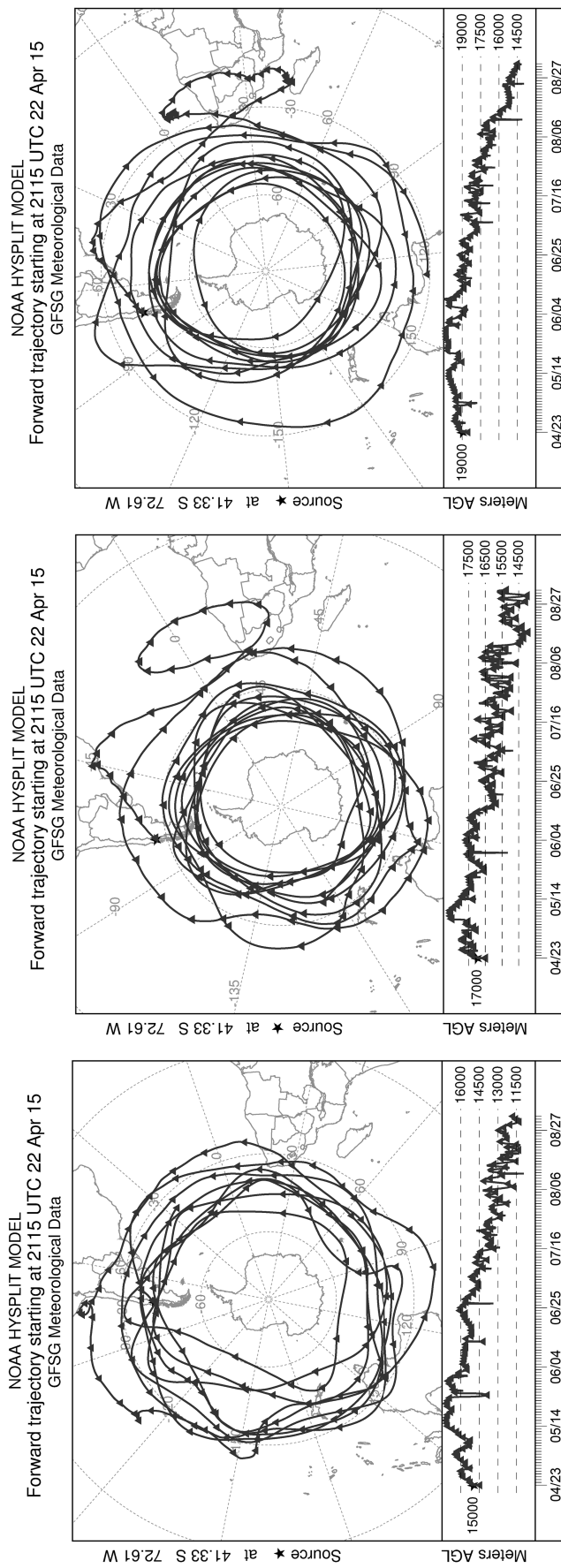


Рис. 3. Линии изменений скоростей осаждения частиц пепла и сернокислотного аэрозоля (СКА) с высоты выброса 17 км после извержения вулкана Кальбуко

Результаты наблюдений [22], проводимых с мая по июль 2015 г., показали, что шлейф извержения вулкана Кальбуко перемещался в восточном направлении между двумя динамическими барьерами, субтропическим течением и антарктическим полярным вихрем, которые ограничивали его широтное распространение. Данные наблюдения [22] хорошо согласуются с результатами траекторного анализа движения вулканогенного аэрозоля в нижней стратосфере. На рис. 4 представлены траектории движения воздушных масс, рассчитанные от координат вулкана Кальбуко и высот 15, 17 и 19 км, от времени извержения 22 апреля 2015 г. до конца августа с использованием модели NOAA HYSPLIT [23] на основе метеоданных NOAA GDAS (0,5°). Видно, что на всех высотах воздушные массы находились в пределах субтропического течения и полярного вихря, не распространяясь при этом ни в полярную, ни в тропическую области.

Заключение

Рассмотрена возможность влияния продуктов извержения чилийского вулкана Кальбуко, произошедшего в апреле 2015 г., на аномальное разрушение стратосферного озона над Антарктидой в октябре–ноябре 2015 г. Формирование масштабной озоновой дыры поздней весной 2015 г. предвзялось повышенными значениями скорости антарктического полярного вихря. В октябре ускорение полярного вихря наблюдалось при уменьшении его площади, существенно превышающей значение климатической нормы. Это проявилось в увеличенной площади озоновой дыры, которая в начале октября достигала ~28 млн км² и в среднем за октябрь превысила 26,5 млн км².



а

б

в

Рис. 4. Прямые траектории шлейфов извержения вулкана Кальбуко от 22 апреля 21:15 (UTC) до 1 сентября 2015 г. с высот 15 (а), 17 (б) и 19 км (в)

Время уменьшения концентрации вулкано-генного аэрозоля в стратосфере в e раз (e -folding time) после извержения вулкана Кальбуко составило 90 дней [22]. До выведения из стратосферы основной массы продуктов этого извержения вулкано-генный аэрозоль мог проникнуть внутрь полярного вихря только на начальной стадии его формирования в апреле. Однако когда вулкано-генный аэрозоль подошел к границам вихря, последний был уже устойчив и стал динамическим барьером. Таким образом, извержение вулкана Кальбуко не могло повлиять на развитие озоновой дыры весной 2015 г. Основной причиной аномального разрушения стратосферного озона над Антарктидой в октябре–ноябре стало поведение полярного вихря в этот период.

1. *Waugh D.W., Randel W.J.* Climatology of Arctic and Antarctic polar vortices using elliptical diagnostics // *J. Atmos. Sci.* 1999. V. 56, N 11. P. 1594–1613.
2. *Waugh D.W., Polvani L.M.* Stratospheric polar vortices // *Stratos. Dynamics: Trans. Chem. Geophys. Monograph Ser.* 2010. V. 190. P. 43–57.
3. *Newman P.A.* Chemistry and dynamics of the Antarctic ozone hole // *Stratos. Dynamics: Trans. Chem. Geophys. Monograph Ser.* 2010. V. 190. P. 157–171.
4. *Solomon S., Garcia R.R., Rowland F.S., Wuebbles D.J.* On the depletion of Antarctic ozone // *Nature*. 1986. V. 321. P. 755–758.
5. *Finlayson-Pitts B.J., Pitts J.N.* Chemistry of the Upper and Lower Atmosphere: Theory, Experiments, and Applications. California: Academic Press, 2000. 969 p.
6. *Manney G.L., Zurek R.W.* On the motion of air through the stratospheric polar vortex // *J. Atmos. Sci.* 1994. V. 51, N 20. P. 2973–2994.
7. *Sobel A.H., Plumb R.A., Waugh D.W.* Methods of calculating transport across the polar vortex edge // *J. Atmos. Sci.* 1997. V. 54, N 18. P. 2241–2260.
8. *Young P.J., Rosenlof K.H., Solomon S., Sherwood S.C., Fu Q., Lamarque J.-F.* Changes in stratospheric temperatures and their implications for changes in the Brewer–Dobson circulation, 1979–2005 // *J. Clim.* 2012. V. 25. P. 1759–1772.
9. *Hofmann D.J., Solomon S.* Ozone destruction through heterogeneous chemistry following the eruption of El Chichon // *J. Geophys. Res. D.* 1989. V. 94, N 4. P. 5029–5041.
10. *McCormick M.P., Thomason L.W., Trepte C.R.* Atmospheric Effects of the Mt. Pinatubo Eruption // *Nature*. 1995. V. 373, N 6513. P. 399–404.
11. *Randel W.J., Wu F., Russell J.M., Waters J.W., Froidevaux L.* Ozone and temperature changes in the stratosphere following the eruption of Pinatubo // *J. Geophys. Res. D.* 1995. V. 100, N 8. P. 16753–16764.
12. *Solomon S., Portmann R.W., Garcia R.R., Randel W.J., Wu F., Nagatani R.M., Gleason J., Thomason L., Poole L.R., McCormick M.P.* Ozone depletion at midlatitudes: Coupling of volcanic aerosols and temperature variability to anthropogenic chlorine // *Geophys. Res. Lett.* 1998. V. 25, N 11. P. 1871–1874.
13. *Robock A.* Volcanic eruptions and climate // *Rev. Geophys.* 2000. V. 38, N 2. P. 191–219.
14. *Solomon S., Ivy D.J., Kinnison D., Mills M.J., Neely R.R., Schmidt A.* Emergence of healing in the Antarctic ozone layer // *Science*. 2016. V. 353. P. 269–274.
15. *Ivy D.J., Solomon S., Kinnison D., Mills M.J., Schmidt A., Neely III R.R.* The influence of the Calbuco eruption on the 2015 Antarctic ozone hole in a fully coupled chemistry-climate model // *Geophys. Res. Lett.* 2017. V. 44, N 5. P. 2556–2561.
16. *Newman P.A., Kawa S.R., Nash E.R.* On the size of the Antarctic ozone hole // *Geophys. Res. Lett.* 2004. V. 31, N 21. P. L21104.
17. *Goddard Space Flight Center (GSFC).* NASA’s Ozone Hole Watch Web Site (online database) [Electronic resource]. URL: <http://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/meteorology/SH.html> (last access: 25.03.2018).
18. *The European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF).* ERA Interim reanalysis (online database) [Electronic resource]. URL: <http://apps.ecmwf.int/datasets/data/interim-full-daily/levtype=pl/> (last access: 25.03.2018).
19. *Global Volcanism Program (GVP).* Smithsonian National Museum of Natural History [Electronic resource]. URL: <https://volcano.si.edu> (last access: 25.03.2018).
20. *Gryazin V.I., Beresnev S.A.* Influence of vertical wind on stratospheric aerosol transport // *Meteorol. Atmos. Phys.* 2011. V. 110, N 3–4. P. 151–162.
21. *Малина К.М.* Справочник сернокислотчика. М.: Химия, 1971. 744 с.
22. *Bugue N., Vignelles D., Berthet G., Portafaix T., Payen G., Jégou F., Benchérif H., Jumelet J., Vernier J.-P., Lurton T., Renard J.-B., Clarisse L., Duvrger V., Posny F., Metzger J.-M., Godin-Beekmann S.* Long-range isentropic transport of stratospheric aerosols over Southern Hemisphere following the Calbuco eruption in April 2015 // *Atmos. Chem. Phys.* 2017. V. 17, N 24. P. 15019–15036.
23. *Draxler R.R., Hess G.D.* An overview of the HYSPLIT_4 modeling system for trajectories, dispersion, and deposition // *Aust. Meteorol. Mag.* 1998. V. 47. P. 295–308.

V.V. Zuev, E.S. Savelieva, T.V. Parezheva. Study of the possible impact of the Calbuco volcano eruption on the abnormal destruction of stratospheric ozone over the Antarctic in spring 2015.

One of the strongest stratospheric ozone depletion events over the Antarctic was observed in October–November 2015. The increase in the ozone hole was associated with the eruption of Calbuco volcano (Chile) in April 2015 with a maximum plume altitude of ~17 km. Based on the ERA-Interim reanalysis data and the NOAA HYSPLIT trajectory model, we estimated the possibility of penetration of volcanic aerosols inside the polar vortex. It was shown that volcanic aerosols could not contribute to the intensification of ozone depletion reactions, because it was outside the stable polar vortex.