

УДК 551.510.43

УДЕРЖИВАНИЕ ЗАРЯЖЕННЫХ ЛЕДЯНЫХ ЧАСТИЦ ПОЛЯРНЫХ СТРАТОСФЕРНЫХ ОБЛАКОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ПОЛЕМ ЗЕМЛИ – КЛЮЧЕВОЙ ПРОЦЕСС В ОБРАЗОВАНИИ ОЗОНОВОЙ ДЕПРЕССИИ?

Ю.Е. Беликов, С.Ш. Николайшвили

Выдвинута гипотеза, что ледяные частицы полярных стратосферных облаков заряжены и удерживаются электрическим полем Земли. Это позволяет объяснить отсутствие или крайне низкий вертикальный транспорт хлорных соединений, а также предположить существенную зависимость размеров ледяных частиц полярных стратосферных облаков (ПСО) от величины электрического поля Земли в нижней стратосфере. Это предположение означает, что содержание озона в стратосфере тесно связано с вариациями величины электрического поля. Это заключение подтверждается экспериментальными наблюдениями.

Ключевые слова: озон, полярные стратосферные облака, электрическое поле Земли, ледяные кристаллы.

ВВЕДЕНИЕ И АНАЛИЗ ДАННЫХ

Анализ баланса хлорсодержащих атмосферных соединений, выполненный нами на базе спутниковых данных [1], показал, что в течение длительного времени, достигающего нескольких месяцев, в полярной стратосфере сохраняется концентрация $Cl_y = HCl + ClONO_2 + ClO_x$. Это указывает, во-первых, на то, что активный хлор выделяется из газовых резервуаров HCl и $ClONO_2$ на поверхности частиц ПСО [2,3]. Действительно, при таком балансе хлорных соединений, растворение в жидких аэрозолях или намораживание HCl на ледяных кристаллах ПСО, а также образование промежуточного HOCl, по крайней мере, в заметных количествах, невозможно [3]. Во-вторых, это свидетельствует об отсутствии или крайне низком вертикальном транспорте хлорных соединений в полярной стратосфере [3].

В то же время, значительные изменения концентрации трассера N_2O в этих же экспериментах [1] свидетельствуют о достаточно сильном вертикальном переносе. Было выдвинуто предположение, что частицы полярных стратосферных облаков электризованы и удерживаются электрическим полем Земли [4].

Высвобождение активного хлора происходит в результате дипольного взаимодействия и прилипания к электризованным частицам ПСО молекул хлорных соединений и других соединений, обладающих значительным электрическим дипольным моментом [2,3]. Налипания

трассера N_2O , обладающего небольшим дипольным моментом, практически не происходит.

ЛЕДЯНЫЕ ЧАСТИЦЫ И ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ ЗЕМЛИ

Предположим, что ледяная сферическая частица массой m , обладающая зарядом q , удерживается электрическим полем Земли. Тогда:

$$E_z q = mg = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho g \quad (1)$$

здесь: E_z – вертикальная составляющая электрического поля Земли, r – радиус частицы.

Оценим размер ледяных частиц, которые могут удерживаться электрическим полем Земли при их максимальной электризации. Согласно [5] связь размера твердой частицы и ее максимального заряда определяется как:

$$q = q_{\max} = \alpha r^2, \text{ где } \alpha = 2,22 \text{ кулон/м}^2 \quad (2)$$

Подставляя значения q в (1) получим значение радиуса частицы, при котором возможно удерживание частицы в пространстве на данном уровне:

$$r = 0,75 \alpha E_z / (\pi \rho g) \quad (3)$$

Электрическое поле в стратосфере неоднократно измерялось. В работе [7] на основе анализа данных 40 экспериментов, проведенных в

средней стратосфере на высотах ~20-30 км, получено эмпирическое выражение для электрического поля в зависимости от дневного положения магнитопаузы R_e , выраженной в единицах земного радиуса:

$$E_z = (527,01 - 31,5R_e)10^{-3} \text{ (В/м)}.$$

Изменения R_e связаны с динамикой солнечного ветра. При возможных изменениях R_e в пределах 6-12 электрическое поле варьируется соответственно в пределах 0,15-0,34 В/м, что соответствует изменению в размере удерживаемых частиц 17,7-40,2 мкм при их предельной электризации (рис. 1). На высоте 18-20 км E_z может достигать, согласно [8], величины ~1 В/м, что соответствует размеру частиц 118 мкм (рис.1). Эти оценки размеров можно рассматривать как предельный случай.

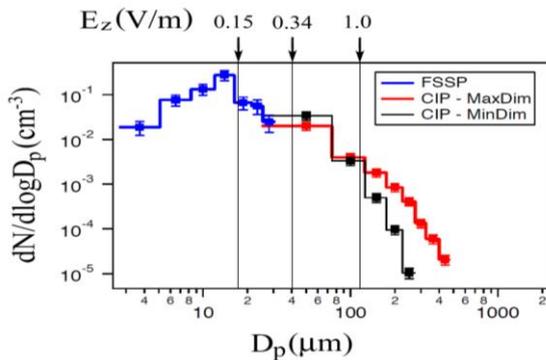


Рис.1. Распределения кристаллов льда по размерам, полученные двумя инструментами FSSP и CIP в тропической стратосфере [6]. Показаны вариации электрического поля в средней стратосфере при различном положении магнитопаузы, а также оценки этого поля в нижней стратосфере [7,8]. Показаны соответствующие размеры максимально заряженных ледяных сферических частиц, которые могут удерживаться этими полями в стратосфере.

Изображения крупных ледяных кристаллов показывают, что их форма отличается от сферической [6], кристаллы имеют сложную форму с включением острых неоднородностей. Это означает, что максимально электризованы

могут быть только «острые» неоднородности кристалла, через которые идет сток заряда. В то же время, вес кристалла существенным образом зависит от его «пористости».

Возможно, что в стратосфере работает своеобразный фильтр крупных ледяных кристаллов: те ледяные кристаллы, которые по форме, весу и заряду удовлетворяют условию равновесия, остаются в стратосфере, другие из нее удаляются.

При увеличении E_z растет вес удерживаемых кристаллов и площадь их поверхности, что приводит к увеличению депрессии озона. В работе [9] для условий Антарктиды экспериментально установлено, что уменьшение общего содержания озона соответствует увеличению электрического поля и уменьшению расстояния до магнитопаузы. Эти наблюдения подтверждают, что удержание заряженных ледяных частиц ПСО электрическим полем Земли является ключевым процессом в образовании озоновой депрессии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ экспериментальных данных показывает, что ледяные кристаллы полярных стратосферных облаков заряжены.

Взаимодействие заряженных ледяных кристаллов с электрическим полем Земли приводит к тому, что в стратосфере могут удерживаться крупные кристаллы льда с отрицательным зарядом. Сделаны оценки верхнего предела размера таких ледяных частиц.

Вариации электрического поля Земли приводят к изменению веса и площади поверхности удерживаемых кристаллов льда, на которой происходят гетерогенные реакции. Это проявляется соответственно в вариациях содержания озона в стратосфере. Эта связь подтверждается экспериментальными данными.

IS RETENTION OF CHARGED ICE PARTICLES OF POLAR STRATOSPHERIC CLOUDS BY THE ELECTRIC FIELD OF THE EARTH A KEY PROCESS IN THE FORMATION OF OZONE DEPRESSION?

Belikov Yu.E., Nikolayshvili S.Sh.

The hypothesis is proposed that ice particles of polar stratosphere clouds (PSCs) are charged and trapped by the Earth's electric field. This hypothesis explains the absence or the lowest vertical transport of chlorine species and allows the assumption of the essential dependence of the sizes of ice particles on the magnitude of the Earth's electric field in the stratosphere. This assumption means that the ozone content in the stratosphere is closely connected to variations in the magnitude of the electric field. This conclusion is justified by experimental observations.

KEYWORDS: OZONE, POLAR STRATOSPHERIC CLOUDS, EARTH'S ELECTRIC FIELD, ICE CRYSTALS.

ЛИТЕРАТУРА

1. Santee M.L. et al., 2008. A study of stratospheric chlorine partitioning based on new satellite measurements and modeling. – *J. Geophys.Res.*, 2008, Vol.113, D12307.
2. Беликов Ю.Е., Николайшвили С.Ш. Возможный механизм разрушения озона на ледяных кристаллах в полярной стратосфере, 2012. – *Метеорология и гидрология*, 2012, с.33-43.
3. Беликов Ю.Е., Николайшвили С.Ш. Влияние электризации ледяных кристаллов в полярной стратосфере на разрушение озона (см. настоящий сборник).
4. Belikov Yu.E. and Nikolaishvili S.Sh. Possible connection of electric field variations with the size of ice particles in the polar stratosphere. - *Russian journal of Earth sciences*, 2012, vol.12, ES4003, doi:10.2205/2012ES000518.
5. Райст П. - *Аэрозоли*. М., Мир, 1987, 278 с.
6. de Reus M. et al.2009. Evidence for ice particles in the tropical stratosphere from in-situ measurements. - *Atmos. Chem. Phys.*, 2009, vol. 9, pp. 6775–6792.
7. Makarova L.N., et al., 2004. Parameterization of the heating in the middle stratosphere due to solar wind-induced electric currents. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, v.66, Issues 13-14,1173-1177.
8. Holzworth R.H., 1991. Conductivity and electric field variations with altitude in the stratosphere. – *J. Geophys.Res.*, 1991, Vol.96, No.D7, pp.12857-12864.
9. Makarova L.N. and Shirochkov A.V., 2001. Impact of the solar dynamics on the ozone density variations. – *Adv. Space Res.*, vol. 27, No.12, pp. 2013-2018.