

ГЕЛИОГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЫПУСК 18, 1-8, 2018

ИССЛЕДОВАНИЯ СРЕДНЕЙ И ВЕРХНЕЙ АТМОСФЕРЫ, ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ГЕОСФЕР

ISSN 2304-7380

Поступила в редакцию 26.03.2018 г.

УДК 551.510.43,551.510.532,551.510.534

# ОСОБЕННОСТИ РАЗРУШЕНИЯ ОЗОНА НА ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦАХ В ПОЛЯРНОЙ СТРАТОСФЕРЕ

Ю. Е. Беликов, С. Ш. Николайшвили, А. Ю. Репин

Показана высокая степень корреляции озона с концентрацией заряженных частиц в полярной стратосфере, что является следствием разрушения озона на заряженных частицах. Раскрывается роль полярных стратосферных облаков и аэрозольных слоев в вариациях заряженных частиц и, соответственно, в вариациях озона внутри и на поверхности аэрозольных слоев при работе глобальной электрической цепи. Показано, что максимальная концентрация заряженных частиц возникает на верхней и нижней горизонтальных границах полярных стратосферных облаков в результате работы глобальной электрической цепи. При этом озоновые дыры возникают внутри полярного вихря в зимне-весенний период в результате опускания верхней границы полярных стратосферных облаков, а вместе с ней и слоя повышенной концентрации заряженных частиц над этой границей примерно до уровня максимальной концентрации озона в нижней стратосфере, где и происходит усиленное разрушение озона заряженными частицами.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ОЗОНОВЫЕ ДЫРЫ, ПОЛЯРНАЯ СТРАТОСФЕРА, ЗАРЯЖЕННЫЕ ЧАСТИЦЫ

### введение

В работах [1-3] показана связь вариаций заряженных частиц с изменением озона, выявлены высотные и пространственные вариации заряженных частиц в полярной стратосфере, показана связь этих изменений с изменением аэрозольной составляющей. В данной работе мы продолжаем анализ этих связей и особое внимание уделим изменению указанных закономерностей внутри, на границе и снаружи полярного вихря.

Важным обстоятельством является тот факт, что ядра конденсации являются своеобразным трассером присутствия заряженных частиц. Согласно [1, 4], изменение концентрации ионов n под действием космических лучей связано с изменением концентрации ядер конденсации CN следующим образом:

d[CN]/dt=An - B[CN],

где n — концентрация ионов (положительных или отрицательных), [CN] — концентрация ядер конденсации, А — коэффициент пропорциональности между изменением концентрации ядер конденсации и концентрацией ионов, В — коэффициент, учитывающий стоки ядер конденсации (прилипание к аэрозолям, образование капель на ядрах конденсации и др.).

В условиях равновесия:

d[CN]/dt=0 и тогда: n=(B/A)[CN], т. е. n~[CN]

Таким образом, ядра конденсации CN являются трассером присутствия заряженных частиц.

Во многих самолетных экспериментах измеряется концентрация ядер конденсации, но не измеряется заряженная компонента, поэтому распределение ядер конденсации дает нам информацию о распределении в пространстве заряженных частиц.

#### СВЯЗЬ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ВАРИАЦИЙ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ С ВАРИАЦИЯМИ ОЗОНА В ПОЛЯРНОЙ СТРАТОСФЕРЕ

На рисунке 1 представлены измерения концентрации ядер конденсации и отношения смеси озона вдоль трассы полета самолета ER-2 внутри полярного вихря 11 марта 2000 г. в рамках эксперимента SOLVE [5].



Рис. 1. Самолетные измерения в Арктике 11 марта 2000 г. в рамках эксперимента SOLVE [5]. Показаны изменения концентрация ядер конденсации и обратные величин отношения смеси озона вдоль трассы полета самолета.

Как видно из этого рисунка, существует хорошая антикорреляция между концентраций ядер конденсации ( и соответственно концентрацией заряженных частиц) с отношением смеси озона. Эта антикорреляция наблюдается на протяжении всей трассы полета самолета.

Рассмотрим теперь положение самолета относительно полярного вихря. Самолет взлетает из Кируны, которая в это время находится внутри полярного вихря и летит к границе вихря. После этого, самолет разворачивается и углубляется в более высокие широты вглубь полярного вихря. Высота полета самолета составляет примерно 20 км. Примерно на ~40000 секунде самолет совершает нырок на высоту ~16 км.

Анализ рисунка 1 показывает, что примерно в промежутки времени ~31000–34000 сек. и ~45000–55000 сек. наблюдается повышенное количество ядер конденсации, что соответствует повышенной концентрации заряженных частиц. Указанные промежутки времени соответствуют положению самолета внутри вихря, тогда как в промежуток времени 34000–45000 сек. самолет находится ближе к границе вихря. В чем же причина увеличения концентрации заряженных частиц

2

внутри вихря и какова здесь роль полярных стратосферных облаков? Рассмотрим более подробно этот вопрос.

## РОЛЬ ПОЛЯРНЫХ СТРАТОСФЕРНЫХ ОБЛАКОВ И АЭРОЗОЛЬНЫХ СЛОЕВ В ВАРИАЦИЯХ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ И ОЗОНА В ПОЛЯРНОЙ СТРАТОСФЕРЕ

На рисунке 2 показано распределение аэрозольной составляющей вдоль трассы полета самолета 11 марта 2000 г. Как видно из этого рисунка на участках полета, где самолет летит внутри вихря (~31000–34000 сек. и ~45000–55000 сек.) наблюдается пониженная общая площадь аэрозольных частиц, тогда как вблизи границы вихря (~34000–45000 сек.) наоборот общая площадь аэрозольных частиц увеличивается.

Такое изменение обусловлено тем, что внутри вихря происходит опускание частиц облаков и аэрозолей и, если на переферии вихря самолет летит внутри аэрозольного слоя, то, приближаясь к центру вихря, самолет летит уже над аэрозольным слоем.

Оказывается изменение концентрации и площади частиц облаков или аэрозолей играет ключевую роль в распределении ядер конденсации и соответственно заряженной компоненты. Изрезанность концентрации озона вдоль трассы полета самолета является следствием изрезанности заряженной компоненты (ядер конденсации). К аэрозольным частицам и частицам полярных стратосферных облаков прилипают ядра конденсации и заряженные частицы. Кроме того, значительная часть ядер конденсации и заряженных частиц служат основой для образования частиц облаков и аэрозольных слоев.



Aerosol total surface area

Рис. 2. Самолетные измерения в Арктике 11 марта 2000 г. в рамках эксперимента SOLVE [5]. Показано изменение общей площади аэрозольных частиц вдоль трассы полета самолета.

В работах [2, 3] показывается, что накопление и перераспределение заряженных частиц в стратосфере происходит при участиии полярных стратосферных облаков и аэрозольных слоев в результате работы глобальной электрической цепи.

На рисунке 3 показаны результаты аэростатных измерений различных атмосферных компонент над Кируной в зимне-весенний период.

Как видно из этого рисунка, над полярными стратосферными облаками существует слой повышенной концентрации ядер конденсации который ассоциируется с повышенной концентрацией заряженных частиц.

Согласно [2, 3] это результат работы глобальной электрической цепи. Существование слоя заряженных частиц над верхней и нижней границей подтверждается аэростатными экспериментом, проведенным над Кируной 12 марта в 2011 г. (рис.3 d, е). При этом образование озоновой депрессии связано с разрушением озона на заряженных частицах.

Отметим, что накопление заряженных частиц идет не только на верхней и нижней границах полярных стратосферных облаков. Наибольшая концентрация заряженных частиц наблюдается на верхней и нижней границах облаков, но в то же время это накопление идет между внутренними слоями облаков из-за неравномерности в высотном распределении частиц аэрозоля и облаков.



Рис. 3. Аэростатные измерения в полярной стратосфере (заимствовано из [2]). Вертикальные высотные профили аэрозольной концентрации (см<sup>-3</sup>) (а) и отношения смеси озона (b) над Кируной 23 января 1989 г. [6]; концентрации ядер конденсации над Кируной 30 января 1989 г. (сплошная линия, с) и концентрация ядер конденсации в Антарктике на 78° ю. ш.: • • • • - 27 августа, 1988; • • • • • - 6 сентября 1988; - • • • - 6 сентября 1988; - • • • - 14 сентября 1988 [7]; высотные профили общей концентрации аэрозолей и незаряженной части аэрозолей (d), а также доля заряженных аэрозолей размером 0.35-1 µm при подъеме и спуске аэростата над Кируной 12 марта 2011 года (e) [8].

В то же время, несмотря на изрезанность высотного профиля заряженных частиц, внутри аэрозольного слоя существует "провал" — уменьшение концентрации заряженных аэрозолей. "Провал" в распределении ядер конденсации и заряженных частиц связан в основном с гидратацией и превращением их в капли полярных стратосферных облаков, а также с прилипанием ядер конденсации и заряженных частиц к каплям воды.

4

# ВАРИАЦИИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ ВНУТРИ И СНАРУЖИ ПОЛЯРНОГО ВИХРЯ В ТЕЧЕНИИ ЗИМЫ И ИХ СВЯЗЬ С ОБРАЗОВАНИЕМ ОЗОНОВОЙ ДЕПРЕССИИ.

Значительный интерес представляет собой характер изменения заряженной компоненты внутри и вне полярного вихря в зимне-весенний период, т. к. образование озоновой депрессии связано с разрушением озона на заряженных частицах в этот период времени.

Как было отмечено выше, изменения концентрации ядер конденсации непосредственно связаны с характером изменения заряженной компоненты. Рассмотрим изменения высотного профиля ядер конденсации внутри и снаружи полярного вихря в различные периоды времени согласно работе [9].

На рисунках 4 и 5 показаны высотные профили ядер конденсации внутри и снаружи полярного вихря, полученные в рамках эксперимента AASE в январе и феврале 1989 г. [9]. Измерения проводились на самолете ER-2, который взлетал с территории Норвегии (59N, 6E). На рисунке 4 показаны зависимости отношения смеси ядер конденсации от потенциальной температуры, а на рисунке 5 приведена зависимость концентрации ядер конденсации от высоты. Внутри полярного вихря рассматриваемые зависимости указаны отдельно для января и февраля, а снаружи приведены средние зависимости за период январь-февраль.

Анализ рисунков 4 и 5 показывает, что внутри вихря идет опускание воздуха. Об этом свидетельствует смещение вниз минимума и верхнего края в распределении ядер конденсации в феврале по сравнению с январем. Причину указанных смещений легко понять если сравнить рисунки 4 и 5 с рисунком 3. Это сравнение показывает, что смещение вниз минимума и верхнего края в распределении ядер конденсации соответствует опусканию аэрозольного слоя, что и должно происходить внутри полярного вихря. Таким образом, причиной опускания заряженных частиц (ядер конденсации) на высоты нижней стратосферы является опускание на эти высоты аэрозольных и облачных слоев вместе со слоем повышенной концентрации заряженных частиц на верхней границе слоев, который создается в результате работы глобальной электрической цепи.

Из рисунка 5 видно, что если в январе на высоты 18–20 км приходился минимум в распределении ядер конденсации, то в феврале месяце минимум сместился на высоту ~17 км, а на высотах 18-20 км произошло существенное возрастание ядер конденсации, а значит и заряженных частиц. Учитывая, что озон также опускается вместе с воздухом на рассматриваемые высоты, то в феврале происходит его усиленное разрушение на заряженных частицах. Это и есть механизм образования озоновой депрессии в полярной стратосфере.



Рис. 4. Зависимости от потенциальной температуры отношения смеси ядер конденсации, приведены средние, а также максимальные и минимальные значения внутри (слева) и снаружи (справа) полярного вихря [9].
Внутри вихря двойной линией показаны средние значения для января и пунктирными линиями показаны экстремумы, одинарной линией показаны средние значения для февраля и точками указаны экстремальные значения. Снаружи вихря одинарной линией показаны средние значения для января и февраля и пунктирными линиями приведены экстремальные значения.



Рис. 5. Высотные профили концентрации ядер конденсации – средние, а также максимальные и минимальные значения внутри (слева) и снаружи (справа) полярного вихря [9]. Внутри вихря двойной линией показаны средние значения для января и пунктирными линиями показаны экстремумы, одинарной линией показаны средние значения для февраля и точками указаны экстремальные значения. Снаружи вихря одинарной линией показаны средние значения показаны одинарной линией и показаны средние значения для февраля и точками указаны экстремальные значения.

Отметим, что снаружи полярного вихря концентрация ядер конденсации на высотах 17–22 км может превышать соответствующие значения концентраций ядер конденсации внутри вихря (рис.5). Однако это не означает, что общее содержание озона снаружи вихря будет меньше, чем внутри вихря. Необходимым фактором образования озоновой депрессии является опускание озона до уровня повышенной концентрации заряженных частиц, где и происходит его усиленное разрушение.

В результате таких динамических процессов общее содержание озона в стратосфере выше уровня ~15–18 км (уровня, до которого опускается озон с высот верхней стратосферы) внутри вихря будет меньше общего содержания озона снаружи вихря. Действительно, снаружи полярного вихря температуры в стратосфере гораздо выше, чем внутри вихря. Из-за низких температур внутри вихря происходит сжатие атмосферы и идет опускание озона вместе с воздухом. Поэтому озоновые "дыры" возникают внутри полярного вихря. Снаружи вихря нет такой "доставки" озона к месту его усиленного разрушения в нижней стратосфере — верхней тропосфере, высотное распределение озона в этой области ближе к среднеширотному типу.

Как показывает наш анализ, наибольшая концентрация заряженных частиц в стратосфере достигается на верхней границе полярных стратосферных облаков (рис.3). Именно на этих высотах идет наиболее быстрое разрушение озона (рис.3b). Внутри полярного вихря идет опускание воздуха, а вместе с ним опускаеся и верхняя граница полярных стратосферных облаков вместе со слоем повышенной концентрации заряженных частиц над этой границей. Об этих процессах свидетельствует характер изменения высотного профиля ядер конденсации от января к февраплю, рассмотренный выше.

Таким образом, чем холоднее стратосфера и сильнее опускание воздуха внутри вихря, тем ниже опускается верхняя граница полярных стратосферных облаков вместе со слоем повышенной концентрации частиц. При достаточно холодной стратосфере слой повышенной концентрации заряженных частиц может опуститься до высот 15–18 км, где достигается максимальная концентрация озона. В результате разрушения озона и образуется озоновые дыры.

В основном полноценные озоновые дыры возникают в Южном полушарии, где существуют более мощные полярные вихри с более низкими температурами, тогда как в Северном полушарии возникают так называемые мини-дыры. Тем не менее в северном полушарии процессы образования озоновых дыр совершенно аналогичны.

Динамику опускания слоя заряженных частиц (слоя повышенной концентрации ядер конденсации) можно увидеть на рис.6, где приведены изменения концентрации ядер конденсации от января к февралю при разных диапазонах потенциальной температуры ТЕТА. Отметим примерное соответствие потенциальной температуры и высоты: 400К-16.0 км, 440К - 18.0 км, 460К – 19.5 км и 480 К – 20.8 км.

Изрезанность концентрации ядер конденсации как внутри вихря так и снаружи определяется пространственным распределением аэрозоля и, увеличение концентрации ядер конденсации может быть связано с их положением на границе аэрозольного или облачного слоя (см. рис. 1 и 2).



Рис. 6. Зависимости концентрации ядер конденсации от потенциальной температуры THETA и широты от края вихря в январе и феврале [9]. Одинарная линия: 400K < THETA <440K. Двойная линия: 440K < THETA <460K. Пунктирная линия: 460K < THETA <480K.

Отметим, что в январяе характер пространственного распределения ядер конденсации (заряженных частиц) внутри и снаружи полярного вихря не сильно отличались друг от друга. Однако уже в феврале месяце на высотах ~18–21 км наблюдается резкий рост ядер конденсации в результате опускания верхней границы полярных стратосферных облаков из-за интенсификации динамических процессов в этом месяце. Отметим, что на уровне ~16–18 км практически нет изменения концентрации ядер конденсации и даже снаружи вихря эта концентрации выше. По всей вероятности, это объясняется тем, что на указанных высотах внутри вихря существуют повышенная концентрация частиц полярных стратосферных облаков или аэрозольных слоев внутри которых уменьшено количество ядер конденсации.

Таким образом, мы выявили особенности механизма формирования озоновых дыр в полярной стратосфере, при этом определили важную роль полярных стратосферных облаков и динамических процессов.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1) Сопоставление высотных и пространственных вариаций заряженных частиц (ядер конденсации) и отношений смеси озона в полярной стратосфере показало их значительную антикорреляцию.

2) Причиной значительных пространственных вариаций концентраций заряженных частиц (ядер конденсации) в полярной стратосфере являются вариации аэрозольных частиц и частиц полярных стратосферных облаков к которым могут прилипать ядра конденсации и заряженные частицы. Кроме того, значительная часть ядер конденсации и заряженных частиц служат основой для образования частиц облаков и аэрозольных слоев.

3) Показано, что основной причиной разрушения озона является его взаимодействие с заряженными частицами.

4) Основное разрушение озона происходит на верхней границе полярных стратосферных облаков или аэрозольных слоев, где наблюдается повышенная концентрация заряженных частиц в результате работы глобальной электрической цепи.

5) На основе рассмотрения вариаций заряженных частиц (ядер конденсации) внутри и снаружи арктического полярного вихря в течении зимы выявлен основной механизм образования озоновых дыр в полярной стратосфере. Озоновые дыры возникают внутри полярного вихря в результате опускания верхней границы полярных стратосферных облаков, а вместе с ней и слоя повышенной концентрации заряженных частиц примерно до уровня максимальной концентрации озона ~18–21 км и ниже. На этих высотах и происходит усиленное разрушение озона заряженными частицами.

#### ЛИТЕРАТУРА

- 1. Беликов Ю. Е., Николайшвили С. Ш. Озоновые дыры результат разрушения озона на заряженных частицах. Гелиогеофизические исследования выпуск 16, 20-30, 2017.
- Belikov Yury and Nikolayshvili Sergey. The Role of the Dipole Interaction of Molecules with Charged Particles in the Polar Stratosphere. Journal of Earth Science and Engineering, 2016.– 6, 115-149, doi: 10.17265/2159-581X/2016.03.001. Открытый доступ к статье на сайте ИПГ http://ipg.geospace.ru в разделе публикации, либо на сайте издательства <u>http://davidpublisher.org/index.php/Home/Article/index?id=26172.html</u>
- 3. Беликов Ю. Е., Николайшвили С. Ш., 2015. Озоновые дыры: новый взгляд. Земля и Вселенная, 2, 27-39.
- 4. Harrison R. G.; Alpin K. L. Atmospheric condensation nuclei formation and high-energy radiation. J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics 2001, 63, 1811 1819.
- 5. SAGE III Ozone Loss and Validation Experiment 1999—2000 (SOLVE), http://espoarchive.nasa.gov/archive/arcs/solve/data.
- Hofmann D. J. et al., 1989. Stratospheric clouds and ozone depletion in the arctic during January 1989. Nature. – V 340. – No. 6229. – pp. 117-121.
- 7. Hofmann D. J., 1990. Measurement of the concentration nuclei profile to 31 km in the Arctic in January and comparison with Antarctic measurements. Geophys. Res. Lett. -V.17. No.4. pp. 357-360.
- 8. Renard J. B. et al., 2013. In situ detection of electrifies aerosols in the upper troposphere and stratosphere. Atmos. Chem. Phys., 13, 1-8, doi: 10.5194/acp-13-1-2013.
- Wilson J. C., Stolzenburg M. R., Clark W. E. 1990. Measurements of condensation nuclei in the airborne arctic stratospheric expedition: observations of particle production in the polar vortex. Geophys.Res. Lett. – V.17. – No.4. pp. 361-364.

# SPECIFIC ASPECTS OF THE OZONE DESTRUCTION ON CHARGED PARTICLES IN THE POLAR ATMOSPHERE

Yu. E Belikov, S. Sh. Nikolaishvili, A. Yu Repin

A high correlation degree between ozone content and charged particle concentration in the polar atmosphere is demonstrated. This correlation is accounted for by the ozone destruction on the charged particles. The role of the polar stratospheric clouds and aerosol layers in the charged particles variation, and consequently, in the ozone concentration change inside and on the surface of the aerosol layers due to the Global Electric Circuit work is revealed. It is shown that the maximum charged particle concentration occurs on the upper and lower horizontal boundaries of the polar stratospheric clouds as a result of the Global Electric Circuit work. In this case ozone holes appear inside the Polar Vortex in winter and spring periods due to the downward motion of the polar stratospheric clouds upper boundary, together with the layer of the increased concentration of the charged particles, situated above this boundary, down to the maximum ozone concentration level in the lower stratosphere, just where the enhanced ozone destruction by the charged particles takes place.

KEYWORDS: OZONE HOLES, THE POLAR STRATOSPHERE, CHARGED PARTICLES.