

Сибирский Федеральный Университет  
пр. Свободный, 79, Красноярск, 660041, Россия  
Красноярский Научный Центр СО РАН,  
Академгородок, 50, Красноярск, 660036, Россия  
E-mail: rtcvbk@rambler.ru

## ОЗОНОВЫЙ ЩИТ ЗЕМЛИ: ЛЕГЕНДЫ И РЕАЛИИ. АЭРОДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АНТАРКТИЧЕСКОЙ ОЗОНОВОЙ ДЫРЫ

В статье по данным спутникового зондирования исследовалась Антарктическая озоновая дыра. Разработан новый метод слежения за движениями воздушных масс в нижней стратосфере. Оценены зональные и меридиональные скорости переноса масс озона в весенний период 1996-2009 гг. Обнаружена тесная корреляция дефицита массы озона в озоновой дыре и зональной скорости в области накопления общего содержания озона в циркумполярном вихре. Предложена аэродинамическая модель циклонической системы, объединяющей циркумполярный вихрь и озоновую дыру.

*Ключевые слова:* динамика стратосферного озона, циркумполярный вихрь, Антарктическая озоновая дыра

Исследование вариаций озоносферы и поиски их причин остаются актуальной проблемой. Озон играет исключительно важную роль в жизни Земли. Озоносфера не пропускает солнечное излучение короче 290 нм, при исходной величине которого органическая жизнь в ее современном виде была бы невозможной. С экологической точки зрения, наиболее важен стратосферный озон, максимум концентрации которого приходится на высоты 16-25 км (нижняя стратосфера). Если собрать весь озон в слой при давлении 760 мм рт. ст. и температуре 0°C, то толщина этого слоя, т.е. общее содержание озона (ОСО), составит около 3 мм или 300 единиц Добсона (е. Д., 1 е. Д. = 10<sup>-3</sup> см).

Обострение интереса к озоновой проблеме связано с тремя аспектами – это долговременное уменьшение суммарного озона, межполушарные различия в сезонном ходе полярного стратосферного озона (особенно в весенний период) и обнаружение локальных озоновых аномалий. Несмотря на большое количество экспериментальных и теоретических исследований, реальные причины убыли суммарного озона до сих пор не установлены.

Снижение весеннего минимума ОСО в южной полярной области обнаружено Г.М. Добсоном в 1957 г. по измерениям в Антарктике. В 1985г. на 70° ю.ш. – 90° ю.ш. было обнаружено устойчивое понижение ОСО над Антарктикой весной ниже климатической нормы (менее 220 е. Д.), получившее название Антарктической озоновой дыры (АОД). В стратосфере Арктики явление подобных масштабов не наблюдается. Однако в озоносфере обоих полушарий выявляются области с пониженным содержанием озона («минидыры»).

На рис. 1, а показано 3d изображение АОД за 29 сентября 2010 г., построенное по данным со спутника Aura (США), прибор OMI. Антарктическая озоновая дыра – фактически это углубление в озоновом слое, поэтому правильнее говорить о «провисании» слоя. На рис. 1, а минимальное значение ОСО в дыре равно 124 е. Д., АОД окружена в средних

широтах (30° ю.ш. – 60° ю.ш.) циркумполярным вихрем (ЦВ) – областью с высоким содержанием озона (до 445 е. Д.).

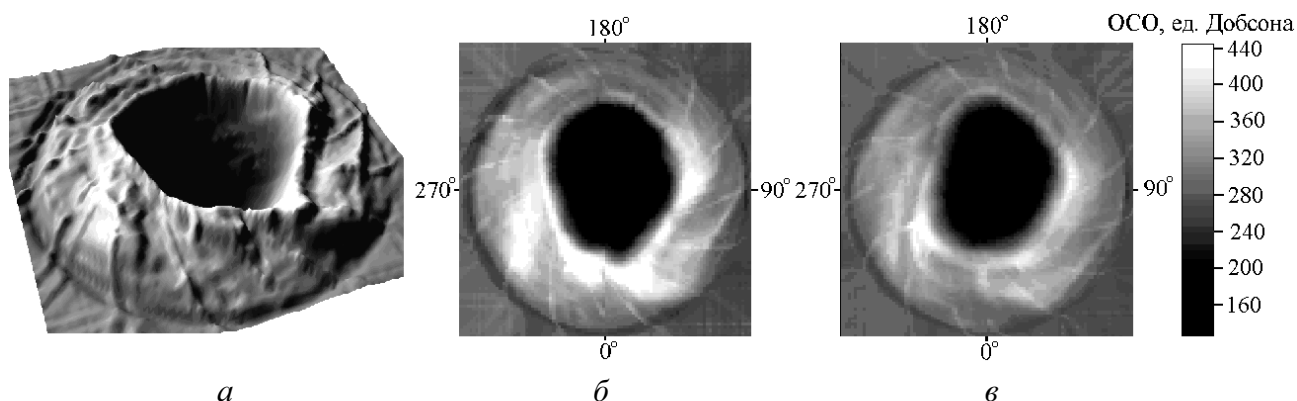


Рис. 1. *a* – 3*d* изображение озонового слоя в Южном полушарии за 29 сентября 2010 г., *б* и *в* – 2*d* изображения за 29 и 30 сентября 2010 г.

Обычно период ежегодного существования АОД составляет 3-3,5 месяца. Падение концентрации озона на 95-97% наблюдается на высоте 14-22 км. Наименьшее количество озона в области АОД варьируется от 194 е. Д. (1979 г.) до 73 е. Д. (1994 г.). Низкое значение ОСО над Антарктикой в 1994 г. связывают с выбросами вулканического аэрозоля, однако труднее объяснить низкое значение ОСО (82 е. Д.), зарегистрированное 9.10.2006. За период 1980-2009 гг. площадь озоновой дыры увеличилась до 29,6 млн. км<sup>2</sup> (2006 г.), что составляет 6% земной поверхности. Дефицит масс озона в дыре увеличился с  $0,6 \cdot 10^9$  кг до  $45 \cdot 10^9$  кг [1].

Сегодня разработаны различные теории и гипотезы относительно механизмов образования озоновых дыр. К сожалению, с середины 80-х годов XX в почти все дальнейшие исследования АОД в основном были направлены на доказательство её антропогенного происхождения. Согласно фреонно-гетерогенной гипотезе, основными факторами формирования АОД являются: изоляция циркумполярным вихрем области дыры от переноса масс озона; продукты хлорфторуглеродов, вызывающие гибель молекул озона; образование полярных стратосферных облаков в июне-августе, на поверхности которых «консервируются» хлорные и азотистые соединения, усиливающие разрушение озона [2, 3].

Однако в химическую антропогенную теорию не укладывается много известных фактов. Во-первых, эта теория не может объяснить увеличение ОСО в отдельных географических регионах. Во-вторых, она не учитывает изменения циркуляции нижней стратосферы, которая оказала наибольшее влияние на сформированное АОД в 2000, 2002 и 2004 годах. И в-третьих, фреонно-гетерогенная теория не может ответить на главный вопрос: почему дыра существует в южном полушарии, хотя фреоны вырабатывались в северном, при том, что в период формирования АОД атмосферный перенос между полушариями, возможно, прекращается? Наконец, почему АОД существует до сих пор, хотя производство фреонов давно запрещено, и было объявлено, что АОД исчезнет к 2010 г.?

В материалах 2006 г. Всемирной метеорологической организации (WMO) и Программы Организации Объединенных Наций по окружающей среде (UNEP), отмечается, что прогноз состояния озонового слоя остается неопределенным, существующие химические модели не позволяют точно воспроизвести наблюдаемые вариации ОСО [2].

## Метод слежения за движениями масс озона в нижней стратосфере

Ответить на ряд вопросов, связанных с проблемой озоновой дыры, удалось с помощью нового метода слежения за движениями масс озона в нижней стратосфере. Подход предполагает детальный анализ пространственно-временных изменений ОСО в нижней стратосфере, и в этом его преимущество перед другими известными подходами (например, методом «пассивного озона»), когда спутниковые (наземные), измерения ОСО сравниваются либо с данными об атмосферных параметрах, либо с результатами модельных расчетов.

В настоящей работе были использованы результаты измерений общего содержания озона, сформированные на основе объединения спутниковых данных TOMS/V8 и OMI за период 1996-2009 гг. [<http://toms.gsfc.nasa.gov>]. Ежедневные данные об ОСО охватывают область по широте от 89°,5 ю.ш. до 89°,5 с.ш. и по долготе от 179°,375 з.д. до 179°,375 в.д. и представлены: для TOMS на сетке с пространственным разрешением 1° по широте и 1°,25 по долготе, для OMI – 1°×1°, соответственно. На рис. 1, б, в приведены 2d изображения озонового слоя южного полушария на 29 и 30 сентября 2010 г. по данным OMI.

Поле ОСО выглядит как «кольцо» с большим ОСО (нередко более 500 е.Д.) диаметром около 7000 км, окружающее область озоновой дыры. Как следует из анализа, в течение нескольких последовательных суток основное изменение озоновой аномалии связано с ее поворотом вокруг полюса и смещением в меридиональном направлении (см. рис. 1). Поле озона выступает как трассер, позволяющий следить за движением воздушных масс.

При изучении движения масс озона в Антарктической озоновой дыре поле ОСО разбивалось на кольца с центром в Южном полюсе, вычислялся коэффициент корреляции между кольцами поля ОСО за предыдущий день и последующий день, например, в 2005 г. в кольце шириной от 30° ю.ш. до 60° ю.ш. он достиг 0,79. Если повернуть кольцо за предыдущий день на восток на 11°, то коэффициент корреляции увеличится до 0,84, если дополнительно сдвинуть его в сторону экватора на 2°, коэффициент корреляции станет равным 0,87. Таким образом, за сутки кольцо повернулось (в среднем) на 11° и сдвинулось (в среднем) на 2°. Всё это позволяет оценивать скорость и направление переноса масс озона.

Значительный интерес представляет озоновый слой в весенний период, когда наблюдается его максимальная динамическая активность, а в южном полушарии образуется АОД. С использованием предложенного метода исследовалось зональное и меридиональное движение масс озона в 1996-2009 гг. Найдено, что зональная скорость масс озона весной в средних широтах в южном полушарии в 1,8 раза больше, чем в северном.

В качестве примера на рис. 2 приведена зависимость меридиональной скорости масс озона от широты в южном полушарии за сентябрь в 1997-2008 гг. Меридиональная скорость, с которой озон выносится из АОД, достигает 1,5 град/сутки. Здесь же показан профиль общего содержания озона в этом полушарии для весны 2006 г.

Рис. 3 иллюстрирует изменение скорости, и направления меридионального переноса от времени для области озоновой дыры в широтной зоне 70°-75° ю.ш. с 1 сентября по 31 октября 2006 г. Положительным значениям скорости соответствует отток масс озона в сторону ЦВ, отрицательным – приток озона из средних широт в озоновую дыру.

Из рис. 3 следует, что к 24.09.2006 (момент максимума площади АОД) преобладает вытекание масс озона из АОД (среднее значение скорости за сентябрь 0,33 град/сутки), далее

начинается поступление (средняя скорость за октябрь 1,22 град/сутки). Таким образом, во время существования озоновой дыры нет полной изоляции области АОД от остальной атмосферы. Нерегулярный характер графика на рис. 3 объясняется тем, что полученные данные относятся ко всей области дыры, в то время как на её отдельных участках наблюдается смена направлений меридионального переноса.



Рис. 2. Зависимость скорости меридионального переноса озона (за 1997-2008 гг.) от широты и типичный средний профиль ОСО в южном полушарии (сентябрь 2006 г.)

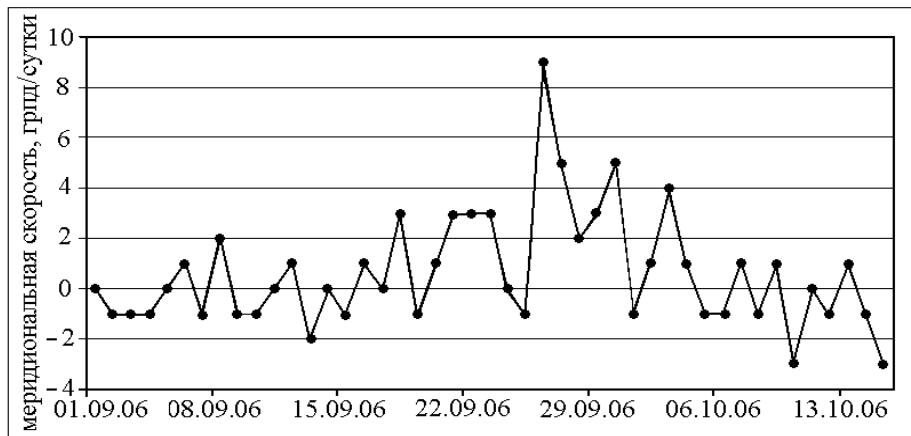


Рис. 3. Зависимость скорости меридионального переноса от времени

Анализ движения масс озона позволил установить, что в 1996-2009 гг. примерно за 8-12 дней до дня минимума ОСО возникают изменения в зональной скорости масс озона: в первые 8-9 дней скорость возрастает, а в следующие 1-3 дня – уменьшается. Выявлены две широтные области накопления озона в ЦВ в разные годы – 45°-50° ю.ш. и 50°-55° ю.ш., в которых оценивалась средняя зональная скорость  $V_{зон}$  за первые 8-9 дней. Полученные значения  $V_{зон}$  приведены на рис. 5. Здесь же показан дефицит массы озона  $O_3MD$  в Антарктической озоновой дыре, взятый в дни минимума ОСО в исследуемый период. Значения  $O_3MD$  рассчитывались согласно [5]. Между  $V_{зон}$  и  $O_3MD$  существует тесная

зависимость, коэффициент корреляции составляет 0,78. Можно утверждать, что изменение количества озона в АОД связано с динамическими процессами в нижней стратосфере.

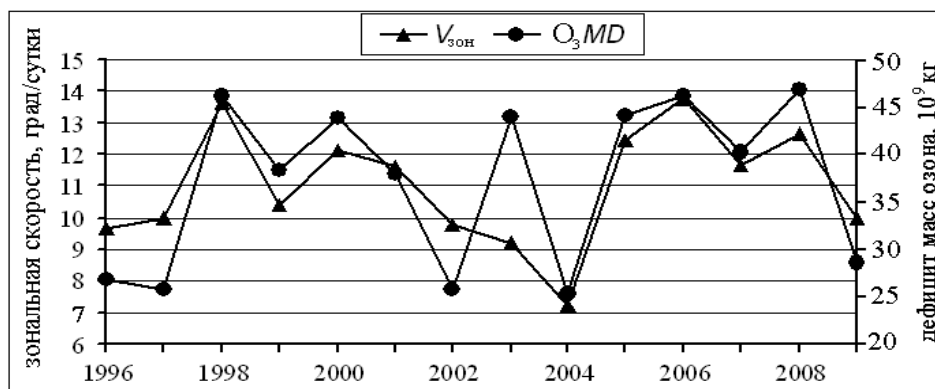


Рис. 3. Изменение зональной скорости в области накопления ОСО и дефицита массы озона в Антарктической озоновой дыре

### Аэродинамическая модель Антарктической озоновой дыры

Согласно циркуляции Брюера-Добсона [2], слой озона в средних широтах создается за счет притока с экватора, а также в результате происходящих там фотохимических реакций. Полярный озон образуется, в основном, за счет поступления с экватора и из средних широт. На полюсе фотохимические реакции замедлены; значительная часть озона, поступающего с экватора, успевает разрушиться в пути. В средних широтах южного полушария воздух вместе с озоном движется, в первом приближении, по замкнутым траекториям вокруг южного полюса, образуется ЦВ, вращающийся с запада на восток – кольцевая область с аномально высоким количеством озона. В конце зимы и весной область ЦВ насыщается озоном, приходящим из тропических областей.

Можно предположить, что внутри озоновой дыры центробежная сила начинает отжимать стратосферные потоки от полюса к средним широтам, и вращение воздуха (вместе с озоном) создает своеобразную центрифугу (рис. 4).

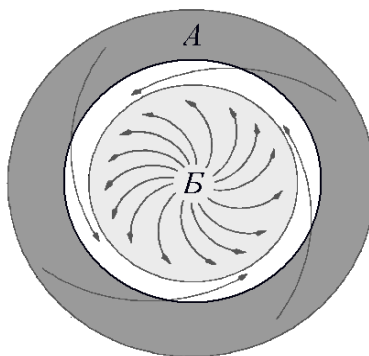


Рис. 4. Стрелки показывают направление переноса масс озона из экваториальной области А в область циркумполярного вихря (выделена белым цветом) и переноса из полярной области Б под действием центробежной силы

В результате действия рассмотренного механизма массы озона из области дыры начинают двигаться по спирали от полюса в сторону ЦВ. Таким образом, в нижней стратосфере южного полушария массы озона движутся одновременно – от экватора и от полюса к средним широтам, где существует быстро вращающийся ЦВ. Количество озона внутри циклонической системы резко падает, над полюсом постепенно образуется озоновая «дыра» с пониженным содержанием озона (менее 220 е. Д.), а в средних широтах – область высокого содержания озона (до 500 и более е. Д.), соответствующая «валу» ЦВ. Разумеется, при этом происходит также некоторая убыль озона в АОД за счет химических и фотохимических реакций хлорного, азотного и др. циклов.

Разработанный метод позволил определить зональные и меридиональные скорости и направления переноса масс озона в нижней стратосфере. Возможная причина отсутствия озоновой дыры в северном полушарии состоит в том, что зональная скорость масс озона весной в средних широтах здесь значительно меньше, чем в южном полушарии. Установлено, что область Антарктической озоновой дыры не изолирована от остальной атмосферы. Обнаружена тесная корреляция между дефицитом масс озона в области озоновой аномалии и зональной скоростью вращения циркумполярного вихря. Результаты обработки спутниковых измерений подтверждают гипотезу о существенном влиянии естественных факторов на образование Антарктической озоновой дыры в период 1996-2009 гг.

#### Список литературы

1. *Tully M.B., Klekociuk A.R., et al.* The Antarctic ozone hole during 2008 and 2009 / Australian Meteorological and Oceanographic Journal. 2011. № 61. P. 77-90.
2. *Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2006.* Global Ozone Research and Monitoring Project. Geneva: WMO, 2007. № 50. 572 p.
3. *Поляков А.В., Тимофеев Ю.М., Виролайнен Я.В.* Полярные стратосферные облака по данным спутниковых наблюдений // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2008. Т. 44. № 4. с. 483-493.
4. *Кашкин В.Б., Рублева Т.В., Хлебопрос Р.Г.* Природоохранная геофизика: проблемы озонового щита планеты // Инженерная экология. 2009. № 4. С. 18-33.
5. *Huck P.E.* The Coupling of Dynamics and Chemistry in the Antarctic Stratosphere. /University of Canterbury, 2007. 158 p.

**V.B. Kashkin, T.V. Rubleva, R.G. Khlebopros, A.A. Baskova**  
**OZONE SHIELD OF THE EARTH: LEGENDS AND REALITIES.**  
**AERODYNAMIC MODEL OF THE ANTARCTIC OZONE HOLE**

The Antarctic ozone hole was investigated using satellite data. A new method of estimation air masses transfer in the lower stratosphere is developed. Zonal and meridian velocities of the ozone masses were calculated during spring 1996-2009. The significant correlation of the ozone mass deficit inside the ozone hole and the zonal velocity of the circumpolar vortex is found. The aerodynamic model of the cyclonic system combining circumpolar vortex and the ozone hole is offered.

**Key words:** stratospheric ozone layer dynamics, circumpolar vortex, Antarctic ozone hole