

УДК 533.9.07

К ОПРЕДЕЛЕНИЮ МЕХАНИЗМА УБЫЛИ ОЗОНА В АТМОСФЕРЕ ЗЕМЛИ

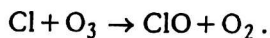
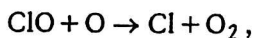
В. А. Сухнев

ЦНИИМашиностроения, г. Королев, Россия

Расчетным путем показано, что основной причиной ежегодной убыли озона в атмосфере являются озонные дыры

В работе [1] предложена методика экспериментального моделирования способа выработки озона в атмосфере Земли, основанного на возбуждении кислорода лазерным излучением с длиной волны $\lambda \approx 762$ нм. Однако в последнее время в печати появляются сообщения о том, что процесс убывания озона должен в ближайшие годы прекратиться, после чего начнется процесс его восстановления без вмешательства человека при условии, что прекратится выброс в атмосферу озоноразрушающих веществ (ОРВ). Такой подход к проблеме убыли озона препятствует развитию способов, позволяющих восстанавливать озон искусственным путем. В настоящей работе проведен более подробный анализ проблемы, позволяющий, с одной стороны, объединить, казалось бы, противоречащие друг другу результаты, а с другой — дать объективный анализ развитию процесса гибели озона.

Механизм образования антарктических озонных дыр, согласно антропогенной гипотезе, подробно описан в работе [2]. Согласно этому механизму предпосылками появления озонных дыр являются циркумполярный вихрь, отделяющий воздух над Антарктидой от окружающего пространства, и наличие в стратосфере ClO , NO_x , HO_x , ClONO_2 , являющихся продуктами выбрасываемых в атмосферу Земли хлорфторуглеродов (ХФУ) и окислов азота NO_x . Непосредственной причиной образования озонных дыр являются полярные стратосферные облака, образующиеся над Антарктидой зимой, когда температура воздуха на высотах 15—22 км достигает $-85 \div 75$ °С. Эти облака состоят из кристаллов льда и капель переохлажденной жидкости. В облаках происходит разложение хлористого нитрозила ClONO_2 на ClO и NO_2 . Азотные соединения аккумулируются стратосферными облаками, а концентрация ClO редко возрастает и начинается активный процесс уничтожения озона в хлорном цикле



Активность этого цикла обусловлена тем фактом, что при большом количестве ClO идет процесс образования димера окиси хлора ClOClO , играющего основную роль в освобождении хлора. Молекулы димера хлора выступают в роли катализатора, а итогом цикла является переход молекулы озона в две молекулы кислорода. Аналогичный механизм гибели озона имеет место в арктических озонных дырах. Таким образом, гибель озона будет существовать до тех пор, пока будут существовать стратосферные облака, а в атмосфере Земли будет находиться, по крайней мере, то количество ХФУ и NO_2 , которое уже выброшено в атмосферу. Относительно того факта, что стратосферные облака будут образовываться и в дальнейшем, никаких сомнений не существует. Ученые установили также время жизни молекул CO_2 и NO_2 в атмосфере не менее 70 лет. Иными словами, перспективы на прекращение гибели озона в антарктических и арктических стратосферных облаках в обозримом будущем не ожидается.

Цель настоящей работы — определить сколько же озона гибнет в озоновых дырах. На рис. 1, заимствованном из работы [3], приведены зависимости среднемесячных значений общего содержания озона (ОСО) над Южным полюсом за период с 1967 по 1997 гг., позволяющие провести соответствующий анализ.

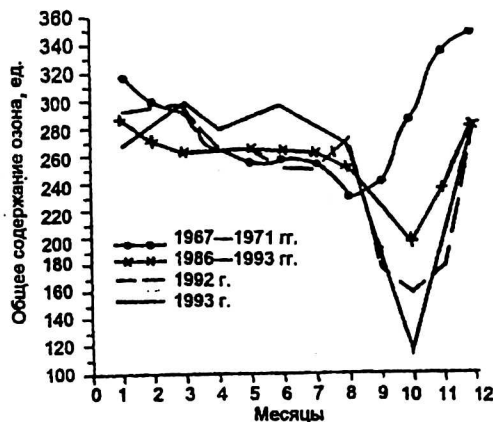


Рис. 1. Среднемесячные значения общего содержания озона над Южным полюсом за периоды с 1967 по 1971 гг. и с 1986 по 1991 гг., а также в 1992 и в 1993 гг.

Введем следующие обозначения:

D_o — величина ОСО (мм), имеющая место для рассматриваемого периода времени при отсутствии озоновой дыры;

D_m — минимальное значение ОСО (мм) в озоновой дыре;

t — продолжительность существования озоновой дыры (в годах);

Зависимость ОСО от времени при наличии озоновой дыры можно с хорошей точностью аппроксимировать треугольником, площадь которого равна

$$F_g [\text{мм} \cdot \text{год}] = 0,5 \Delta t (D_o - D_m), \quad (1)$$

величина F_g является полной потерей озона с единицы площади дыры за время ее существования.

В работе [1] приведена зависимость количества озона от широты φ , полученная специально оборудованным самолетом, движущимся от шестидесятой широты по меридиану к южному полюсу. Из приведенных данных следует, что при $\varphi < 66^\circ$ концентрация O_3 равна ее среднему значению вне дыры. При $\varphi > 72^\circ$ концентрация O_3 постоянна и равна ее значению на Южном полюсе. При $66^\circ < \varphi < 72^\circ$ имеет место переход между двумя упомянутыми значениями, включающий в себя локальные экстремумы. С достаточной для дальнейших вычислений точностью можно принять, что переход происходит по прямой линии. Тогда учет переходной зоны при определении размеров озоновой дыры в плане осуществляется ее увеличением до широты $\varphi = 69^\circ$, являющейся средним значением для ширины зоны. В рассматриваемом случае площадь озоновой дыры равна площади S_g части поверхности Земли, имеющей форму шарового сегмента, для которого:

$$a = R \cos \varphi; \quad b = R(1 - \sin \varphi), \quad (2)$$

Тогда

$$S_g = \pi R^2 (2 - 2 \sin \varphi + \cos^2 \varphi).$$

Общая потеря озона в дыре, размер которой равен S_g , определяется по формуле

$$A_{go} [\text{мм} \cdot \text{год} \cdot \text{м}^2] = 0,5 \pi R^2 (2 - 2 \sin \varphi + \cos^2 \varphi) \Delta t (D_o - D_m). \quad (3)$$

Общее количество озона во всей атмосфере Земли определяется по формуле

$$A_{oo} [\text{мм} \cdot \text{год} \cdot \text{м}^2] = 4 \pi R^2 D_{oo}, \quad (4)$$

где D_{oo} — среднее значение (в мм) толщины озонового слоя для Земли.

В озоновой дыре за время ее существования гибнет часть η от величины A_{oo} , определяемая по формуле

$$\eta = \frac{(2 - 2 \sin \varphi + \cos^2 \varphi) \Delta t (D_o - D_m)}{0,08 D_{oo}}, \% \quad (5)$$

Для определения числовых значений η проведем аппроксимацию приведенных на рис. 1 зависимостей. Результаты аппроксимации приведены в таблице.

Интервал времени	1967—1971 гг.	1986—1993 гг.	1992 г.	1993 г.	1996 г.
Δt , год	0,25	0,36	0,30	0,35	0,4
D_o , мм	2,70	2,65	2,70	2,90	2,80
D_m , мм	2,30	2,00	1,40	1,15	1,30
η , %	0,108	0,254	0,423	0,666	0,652

Согласно сказанному выше, принимаем $\varphi = 69^\circ$. Данные по параметрам озоновой дыры в Антарктике в 1996 г. с 11 сентября по 31 ноября представлены в виде осредненных за месяц изолиний. Для определения величины η "по минимуму" принимаем, что $D_{oo} = 3$ мм (300 ед). Результаты расчета величины η также приведены в таблице. Видно, что имеет место явная тенденция к увеличению темпа роста величины η по мере приближения к девяностым годам. В последние годы наблюдается отсутствие явного роста величины η . Здесь может быть несколько причин этого факта. В частности, не исключено, что в 1995—1996 гг. имел место максимум убыли озона за счет влияния пыли, образовавшейся при извержении вулкана Пикотубо в Индонезии в 1991 г. Другой причиной может быть стабилизация интенсивности озоновой дыры в Антарктиде. Окончательный вывод может быть сделан лишь после накопления аналогичных данных для периода после 1996г., а также обработки данных по интенсивности за 1964 и 1965 гг., которые неизвестны.

Примем, что озоновые дыры в Антарктиде появились лишь после 1965 г. Тогда, интегрируя приведенную на рис. 2 зависимость η от времени по формуле

$$\xi(t) = \int_0^t \eta(\tau) d\tau \quad (6)$$

получим зависимость убыли полного содержания озона в атмосфере Земли в зависимости от времени. При интегрировании принимаем, что в период с 1965 по 1971 гг.

$\eta = 0,108$. С 1971 г. η растет линейно до значения $\eta = 0,254$ в 1986 г. В период 1986—1991 гг. величина $\eta = 0,254$. В последующие годы значения η приведены в таблице. Результаты интегрирования приведены на рис. 3.

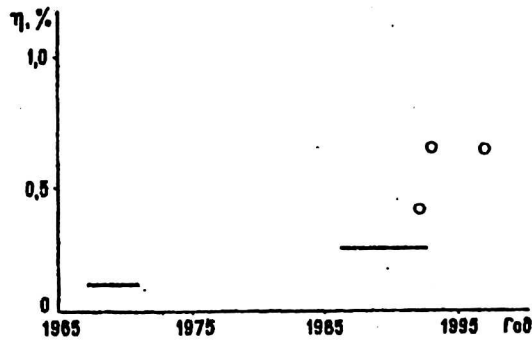


Рис. 2. Зависимость от времени полного содержания озона в атмосфере Земли (по данным таблицы)

Для анализа данных об интенсивности озоновой дыры в Антарктиде при наличии линий равных значений чисел Добсона (данные ЦАО за 1996 г.) может быть использована следующая методика. Аппроксимируем изолинии окружностями и определяем величину широтного угла для каждой окружности. Принимаем, что в кольце, образованном соседними изолиниями, величина числа Добсона постоянна и равна его значению на внутренней (D_{\min}) или на внешней (D_{\max}) стороне кольца. Зная величину φ для каждой изолинии по формуле (2) можно определить величину площади шарового сегмента, покрывающего южный полюс. По формуле

$$S_{mc}^i = \pi R^2 \left[-2 \sin \varphi_{i+1} + \cos^2 \varphi_{i+1} + 2 \sin \varphi_i - \cos^2 \varphi_i \right] \quad (7)$$

определяется площадь шарового слоя. Здесь φ_i — угол, соответствующий внутренней изолинии, а φ_{i+1} — внешней изоляции.

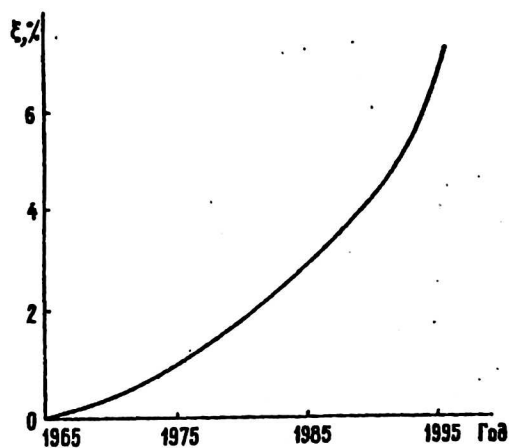


Рис. 3. Изменение по времени полного содержания озона в атмосфере Земли

Общее количество озона, находящегося над Антарктидой в рассматриваемом месяце, вычисляется по формуле

$$Q_z = S_g D_i + \sum_{i=1}^n S_{mc}^i D_i, \quad (8)$$

где D_i — значения числа Добсона на i -й изолинии; n — номер изолинии, соответствующей значению $D_n = 300$ ед.

Следует подчеркнуть, что по формуле (7) определяется максимальное значение величины Q_{\max} . При определении минимального значения Q_{\min} вместо величины D_i в формулу (8) подставляются значения $(D_i - \Delta D)$, где ΔD — разница в значениях D_i для соседних изолиний. Для рассматриваемого случая $\Delta D = 25$ ед. По формуле

$$Q_o = D_o \left(S_g + \sum_{i=1}^n S_{mc}^i \right) \quad (9)$$

определяется то значение Q_o , которое имело бы место над Антарктидой в случае отсутствия озоновой дыры. Убыль озона над Антарктидой для каждого рассматриваемого месяца определяется из соотношения

$$\xi_{z+1} = 1 - Q_z / Q_o. \quad (10)$$

Под индексом z понимается {max, min}, а под индексом $z + 1$ {min, max}. Значения ξ_{z+1} в зависимости от месяца приведены на рис. 4. Видно, что при появлении озоновой дыры величина ξ_{z+1} быстро нарастает, а ее убывание происходит, по всей видимости, более медленно. Для того чтобы установить ход зависимости величины ξ_{z+1} от времени, нужны дополнительные данные как для августа, так и для декабря месяца. Кроме того, интервал осреднения должен быть меньше месяца.

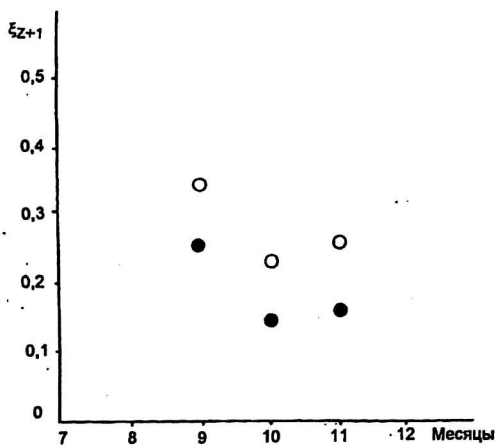


Рис. 4. Изменение величины ξ_{z+1} в антарктической озоновой дыре в сентябре — ноябре 1996 г.:

○ — максимум; ● — минимум

Анализ показывает, что полученные данные хорошо согласуются с имеющимися в различных источниках. На основании этого факта можно утверждать, что величина годовой убыли полного содержания озона в атмосфере Земли до 1996 г. практически совпадала с убылью озона в антарктической дыре. В последние годы кроме антарктических появились озоновые дыры в Северном полушарии, в основном над северными районами Евразии. При определении убыли полного содержания озона в атмосфере Земли эти дыры необходимо учитывать, т. к. это может привести к значительному увеличению $\eta(t)$.

Отмеченный факт означает также, что вне озоновых дыр убыль озона если и существует, то настолько мала по сравнению с изменчивостью озона за счет адвекции, что вряд ли может быть зафиксирована современным оборудованием. Следовательно правы все исследователи, которые утверждают, что изменчивость концентрации озона по высоте обусловлена лишь перемещениями масс в тропосфере и стратосфере под пунктом наблюдения.

Воздействие хлорфторуглеродов на озон вне озоновых дыр практически полностью парируется окислами азота, вымораживание которых в стратосферных облаках и является основой потери озона в хлорном цикле. Отсюда следует, что резкое уменьшение содержания окислов азота или хлорфторуглеродов в атмосфере может привести к тому, что убыль озона интенсифицируется по всей поверхности Земли. Прежде чем бороться с озоноразрушающими веществами в атмосфере или резко сокращать производство одного из них, необходимо провести корректные расчеты последствий этих шагов.

Из приведенных результатов следует, что пока существуют озоновые дыры, полное содержание озона в атмосфере Земли будет убывать. Если не принять адекватных мер, например создать систему, позволяющую восстанавливать ежегодную убыль озона на основе запатентованного в России способа [4], то рано или поздно биосферу Земли постигнет катастрофа не менее страшная, чем термоядерная война, но только более продолжительная, что усугубит агонию. Если принять, что темпы убыли озона сохранятся на уровне 1993—1996 гг. ($\sim 0,7\%$), а он может возрасти за счет озоновых дыр в Северном полушарии, то убыль равная $\sim 30\%$, что по мнению компетентных специалистов будет означать катастрофу, будет достигнута к 2030 году.

Л и т е р а т у р а

1. Кравцов Н. И., Епишкин Ю. А., Мишин Г. С., Наумкин Н. И., Пугачев В. П., Соколов Ю. А., Сухнев В. А., Фирсов В. В. Исследование взаимодействия лазерного излучения с кислородом воздуха при моделировании процесса восстановления озонового слоя // Прикладная физика. 1997. Вып. 4. С. 41.
2. Данилов А. Д., Кароль И. Л. Атмосферный озон — сенсации и реальность. — Л.: Гидрометеоздат, 1991. — 120 с.
3. Кароль И. Л., Киселев А. А. Озонсфера Земли в опасности // Экология и жизнь. 1996. № 1. С. 19—25.
4. Старик А. М. О проблеме сохранения озонового слоя Земли при продолжающемся антропогенном загрязнении атмосферы // Прикладная физика. 1996. Вып. 1. С. 11—29.

INVESTIGATION OF THE OZONE-DEPLETING MECHANISM

V. A. Sukhnev

Central research institute of engineering, Korolev, Russia

Studies using computation indicate that ozone holes are chiefly responsible for the annual reductions in stratospheric ozone.