УДК 551.510.43, 551.510.532, 551.510.534

ОЗОНОВЫЕ ДЫРЫ – РЕЗУЛЬТАТ РАЗРУШЕНИЯ ОЗОНА НА ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦАХ

Ю. Е. Беликов, С. Ш. Николайшвили

Поступила в редакцию 04.12.2017 г.

Рассмотрено образование озоновых дыр в полярной стратосфере в зимне-весенний период. Разрушение озона происходит на заряженных частицах, которые образуются в полярной стратосфере под действием галактических космических лучей. Внутри полярного вихря воздушные массы, в том числе молекулы озона, опускаются до высот, где наблюдается повышенная концентрация заряженных частиц. Показано, что вклад хлорсодержащих соединений в разрушение озона не является основным, а появление озоновых дыр в конце 70-х – начале 80-х годов прошлого столетия вызвано практически одновременными уменьшением солнечной активности и мощными извержениями вулканов, что повлекло за собой изменение динамики стратосферы.

Ключевые слова: ОЗОНОВЫЕ ДЫРЫ, ПОЛЯРНАЯ СТРАТОСФЕРА, ЗАРЯЖЕННЫЕ ЧАСТИЦЫ.

ВВЕДЕНИЕ

Озоновые дыры образуются в полярных стратосфере в зимне-весенний период. Обычно говорят, что озоновые дыры образуются в южном полушарии, тогда как в северном наблюдаются только так называемые “мини-дыры”. Отметим, что первоначально факт обнаружения озоновой “дыры” вызвал некоторое недоумение. Было непонятно, почему озоновые дыры возникают именно в полярных областях, вдалеке от густонаселенных районов. Для объяснения этого факта были предложены различные гипотезы. Некоторые основывались на особенностях динамики полярной атмосферы [1], в других предполагалось влияние на озоновый слой космических лучей.

Рассмотрим подробнее последнюю гипотезу.

Еще до обнаружения озоновых дыр высказывалось предположение, что вариации содержания озона в высоких широтах связаны с космическими лучами, интенсивность которых в стратосфере модулируется солнечной активностью [2]. Космические лучи создают повышенную концентрацию окиси азота, что влияет на содержание озона. Измерения до 80-х годов прошлого столетия показывали высокую корреляцию общего содержания озона с уровнем солнечной активности [3,4], что фактически означает антикорреляцию концентрации озона в стратосфере с интенсивностью космических лучей. Обратим внимание, что привлекательность гипотезы влияния космических лучей на озон связана прежде всего с тем, что основное воздействие космические лучи оказывают на полярную стратосферу, при этом диапазон высот, где скорость ионизации стратосферы космическими лучами максимальна, примерно совпадает с областью пониженной концентрации озона при образовании озоновой дыры (рис.1).

В работах [5-8] на основе анализа полярных экспериментов и теоретических оценок показано, что основное разрушение стратосферного озона происходит при столкновениях молекул O_3 с заряженными частицами, которые образуются под действием космических лучей. При этом следует подчеркнуть, что озоновая дыра появляется в результате динамических процессов, при которых внутри холодного вихря озон опускается до высоты ~15км, где находится главный максимум заряженных частиц. На этих высотах и происходит основное разрушение молекул озона (рис. 1).

Беликов Юрий Евгеньевич, д.ф-м.н, зав.лаб., ФГБУ «ИПГ», e-mail: yury_belikov@mail.ru

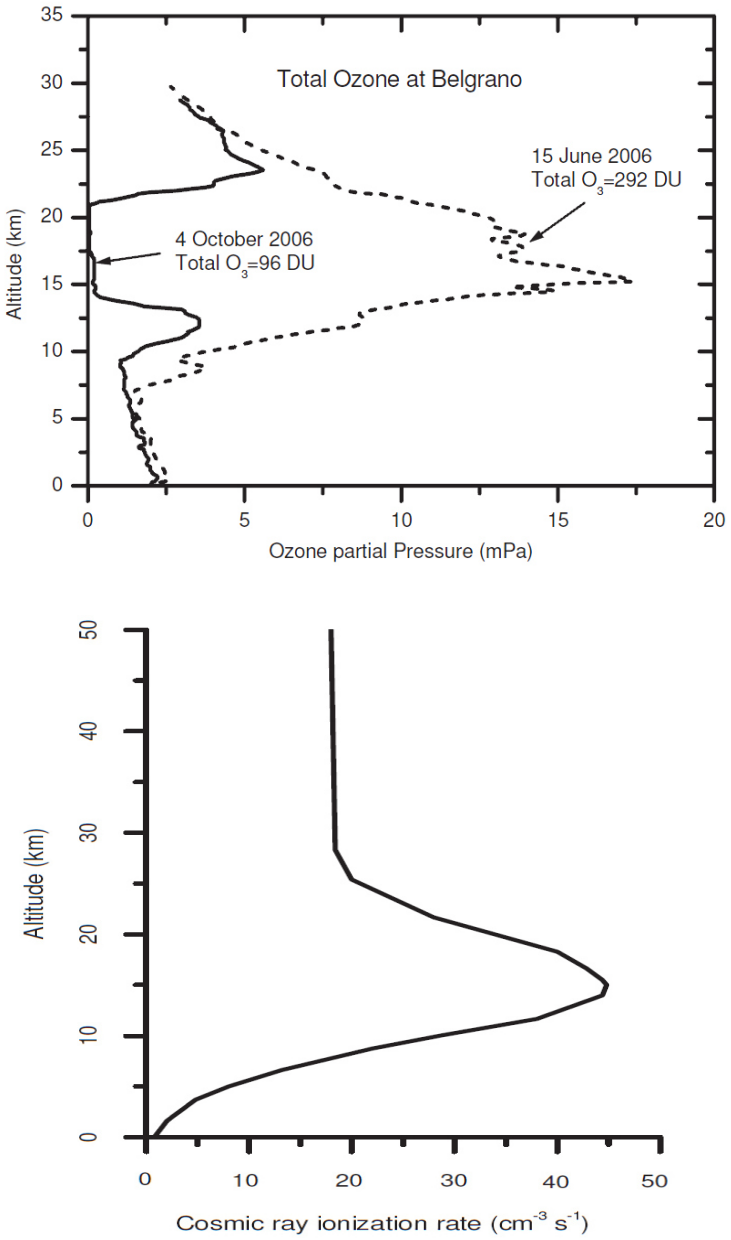

Рис. 1. Парциальное давление озона как функция высоты на полярной станции Белграно (77ºю.ш., 35ºз.д.) в Антарктике в июне и октябре 2006 г. (вверху). Скорость ионизации космическими лучами в зависимости от высоты согласно [9,10,11] (внизу).

Изменение динамики атмосферы в начале 80-х годов прошлого столетия, а не увеличение содержания хлорных соединений в стратосфере, могло послужить началом эпохи образования озоновых дыр. Увеличение концентрации галогенов в стратосфере может быть также связано с динамикой стратосферы. Перенос таких соединений, как HCl и $ClONO_2$, внутри полярного вихря из верхней стратосферы в нижнюю (в область повышенной концентрации заряженных частиц) приводит к увеличению концентрации окиси хлора ClO в нижней стратосфере. Согласно [5-8], это происходит в результате образования ClO из хлорных резервуаров (HCl и $ClONO_2$) при химических реакциях с участием заряженных частиц. Аналогичные процессы приводят к накоплению в нижней стратосфере других галогенов. При этом вопрос, действительно ли галогены являются основной причиной образования озоновых дыр, остается открытым.

Цель данной работы – обобщить как полученные ранее, так и привести новые аргументы в пользу механизма разрушения озона заряженными частицами.

АНТИКОРРЕЛЯЦИЯ ОЗОНА И ЯДЕР КОНДЕНСАЦИИ В ПОЛЯРНОЙ АТМОСФЕРЕ – СВИДЕТЕЛЬСТВО РАЗРУШЕНИЯ ОЗОНА ЗАРЯЖЕННЫМИ ЧАСТИЦАМИ

Основным доказательством разрушение озона хлорными соединениями служит наблюдаемая антикорреляция озона и окиси хлора в полярном вихре. Прямых доказательств разрушения озонового слоя хлорными соединениями в стратосфере нет (см. ниже). Рассмотрим рис. 2, опубликованный в [12]. Этот рисунок приводился во многих научных изданиях, как доказательство разрушения озона хлорными соединениями. Здесь представлены самолетные измерения внутри полярного вихря в Антарктике 23 августа и 16 сентября 1987 года. При этом 23 августа не обнаружено значимых корреляций озона с ClO, в то время как 16 сентября наблюдается высокая степень антикорреляции озона и ClO.

Общепринятая точка зрения заключается в том, что основным механизмом разрушения озона является каталитический хлорный димерный цикл, и интерпретация рассматриваемых измерений следующая. 23 августа концентрация ClO еще недостаточно велика (необходимо [ClO] ~ 1ppb) , так же как невелика высота Солнца над горизонтом для эффективной работы хлорного димерного цикла. Напомним, что ClO накапливается внутри полярного вихря в результате высвобождения атомов хлора в основном из HCl и $ClONO_2$ при гетерогенных реакциях на поверхности частиц полярных стратосферных облаков. В то же время, как видно из рисунка, 16 сентября при бóльшей высоте Солнца максимальная концентрация ClO существенно выше, чем 23 августа. Эти факторы считаются достаточными для эффективного разрушения озона в основном посредством хлорного димерного цикла с участием ClO.

В то же время наш анализ показывает, что ClO является побочным продуктом фотохимических реакций с участием заряженных частиц и, по всей вероятности, окись хлора ClO не имеет никакого отношения к разрушению озона.

Приведем некоторые результаты, полученные в [5]. Верхняя часть рис. 2 построена только для части траектории полета ER-2. Более полные данные приведены на нижней части рис. 2, где затемненная область показывает часть траектории, соответствующую верхней части рисунка. Как видно из рис. 2, практически вдоль всей траектории полета (где проводились измерения) как 23 августа, так и 16 сентября, существует антикорреляция озона и концентрации ядер конденсации. В то же время антикорреляция озона и ClO наблюдалась только 16 сентября и только на ограниченном участке траектории (верхняя часть рисунка). Корреляция озона и ядер конденсации не случайна, потому что ядра конденсации являются своеобразным индикатором присутствия заряженных частиц. Увеличенная концентрация CN соответствует повышенной концентрации заряженных частиц, и наоборот.

Остановимся подробней на связи концентрации CN с концентрацией заряженных частиц в атмосфере, которая рассматривалась в [14]. В этой работе проверялось предположение о том, что космическая радиация влияет на образование ядер конденсации, а значит, и на образование облаков. Как известно, космическая радиация создает повышенное число ионов, которые и служат основой образования ядер конденсации. С целью проверки этого предположения проводились одновременные измерения радиоактивности и измерения ионов [15], а также измерения количества ядер конденсации [14].

Два счетчика Гейгера, разнесенные на расстояние 500 м, контролировали радиационный фон. Для повышения вероятности того, что событие связано именно с космическими лучами, учитывались только события с коэффициентом корреляции срабатываний двух счетчиков не ниже ≈ 0.95. Измерения проводились 25 февраля 2000 г. на высоте 66 м в метеоцентре в Англии (51,45°с.ш., 0.9°з.д.) [14].

В период времени 14:00-15:00 GMT наблюдалась увеличенное срабатывание счетчиков Гейгера, что, по мнению экспериментаторов, связано с увеличением активности космических лучей. Именно в этот период (рис. 3) наблюдалась хорошая корреляция между скоростью изменения концентрации ядер конденсации и отрицательной проводимостью атмосферы, т.е. количеством отрицательных ионов и частиц. При этом коэффициент корреляции на указанном отрезке времени составил 0.55.

В то же время коэффициент корреляции между концентрацией ядер конденсации и скоростью ветра в тот же период времени невелика и составляет всего 0.05. Это свидетельствует о том, что вклад динамических процессов в изменение [ядер конденсации] мал. Таким образом, усиление активности космических лучей приводит к росту концентрации ионов в атмосфере и к повышению концентрации ядер конденсации.

© Институт прикладной геофизики имени академика Е.К.Федорова ISSN 2304-7380

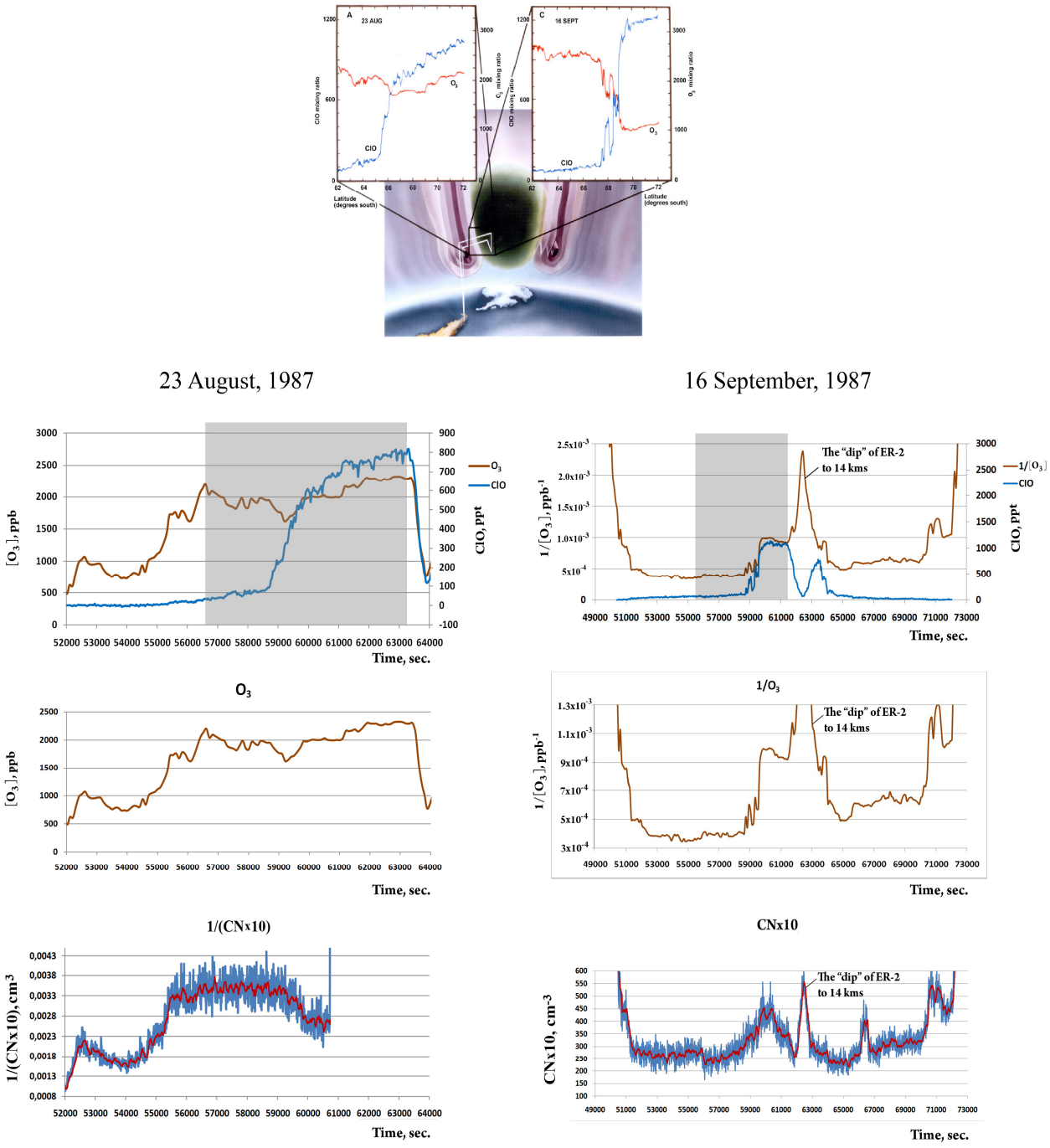

Рис. 2. Измерения, выполненные на самолете ER-2 23.08 и 16.09.1987 г. в рамках эксперимента AAOE [13]: иллюстрация измерений озона и окиси хлора на части трассы полета самолета ER-2 согласно [12] (вверху); в нижней части показаны результаты измерений, построенные согласно общедоступным данным [13] на протяжении всей трассы полета самолета ER-2; для 23.08 показаны измерения отношения смеси озона и окиси хлора, а также, а также обратные величины концентрация ядер конденсации, увеличенные в 10 раз; для 16.09 показаны обратные величины отношения смеси озона, отношение смеси окиси хлора ClO и концентрация ядер конденсации, увеличенная в 10 раз. Затемненные области являются участками полета самолета, которые рассмотрены на верхней части рисунка.

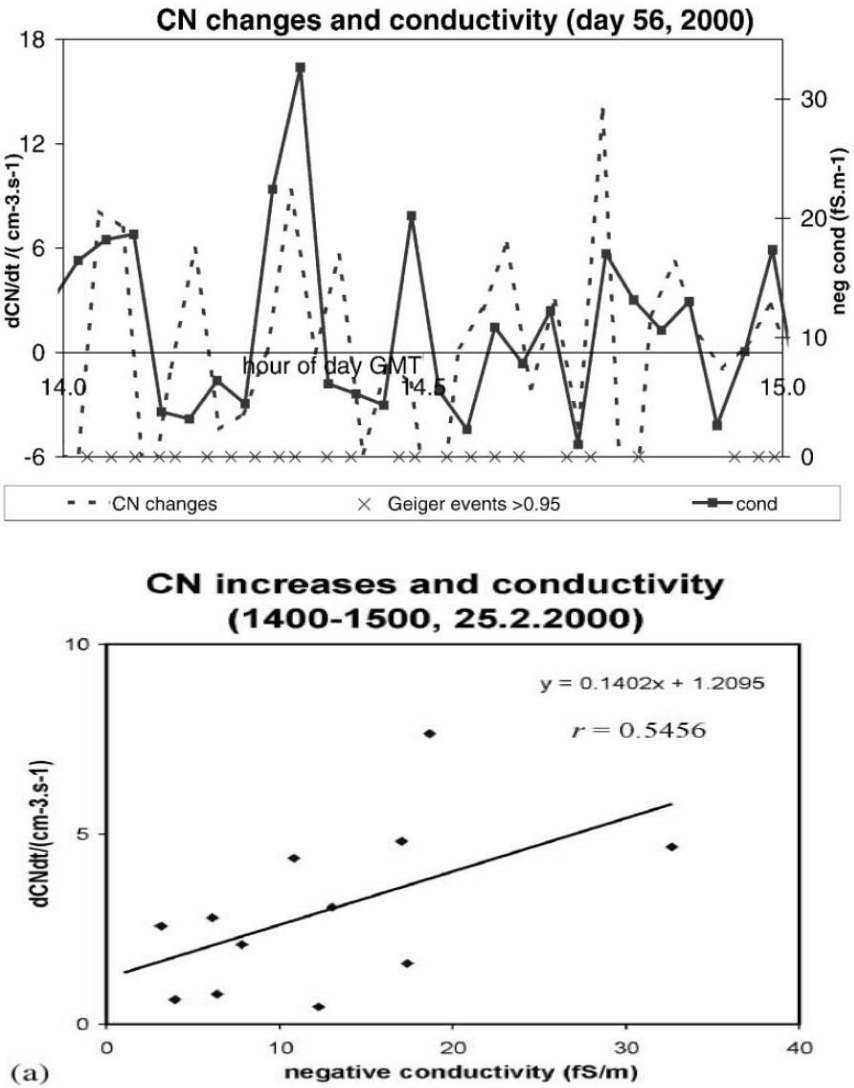

Рис. 3. Скорость изменения [ядер конденсации] и отрицательная проводимость в период времени 1400 -1500 GMT. Коэффициент корреляции этих величин при этом составил 0.55 [14].

Учитывая полученные экспериментальные результаты, можно определить баланс ядер конденсации как:

$$d[CN]/dt=An – B[CN],$$

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

$$d[CN] /dt=0$$

и тогда:

$$n=(B/A)[CN], \text{ т.е. } n\sim[CN]$$

Таким образом, ядра конденсации CN являются индикатором присутствия заряженных частиц и антикорреляция озона и ядер конденсации означает антикорреляцию озона и концентрации заряженных частиц.

© Институт прикладной геофизики имени академика Е.К.Федорова ISSN 2304-7380

Аналогичные антикорреляции озона и концентрации ядер конденсации (заряженных частиц) наблюдались и в Арктике. В [5,6] приводится пример существования аналогичной антикорреляции на протяжении всего полета самолета ER-2 в полярной стратосфере [16], а также показана прямая связь разрушения озона с накоплением заряженных частиц на горизонтальных границах полярных стратосферных облаков. Существование антикорреляции озона и заряженных частиц в ночных условиях, а также при практически полном отсутствии ClO доказывает, что окись хлора не имеет отношения к разрушению озона. Напомним, что в ночных условиях, в отсутствии солнечного излучения невозможно протекание каталитического хлорного димерного цикла, а поэтому озон не может разрушаться ночью с помощью этого механизма. В то же время заряженные частицы могут разрушать озон и днем и ночью.

Как показано в [5,6] на эффективной поверхности заряженного кластера, в результате распада молекул озона и взаимодействия образовавшихся атомов кислорода с молекулами воды в окружении иона, могут образовываться молекулы гидроксила OH. Столкновение различных молекул с заряженными кластерами приводит к взаимодействию этих молекул с гидроксилом OH и образованию новых соединений. Таким образом, например, происходит накопление в полярном вихре молекул ClO при взаимодействии HCl и $ClONO_2$ с гидроксилом OH. Однако к распаду озона, как было указано выше, ClO не имеет отношения. В результате этих процессов молекулы озона разрушаются безвозвратно [5,6]. Разрушение происходит в режиме “столкновений” с заряженными кластерами, что приводит, совместно с динамическими процессами, к образованию значительных озоновых депрессий, в том числе озоновых дыр. Рассмотрим возможные причины, по которым может не работать хлорный димерный цикл, что является важным для понимания процессов, которые происходят в полярной стратосфере.

ПОЧЕМУ ХЛОРНЫЙ ДИМЕРНЫЙ КАТАЛИТИЧЕСКИЙ ЦИКЛ МОЖЕТ НЕ РАБОТАТЬ В СТРАТОСФЕРЕ

Следует отметить, что прямых лабораторных измерений разрушения озона хлором (при концентрациях хлора и озона, характерных для полярной стратосферы) не существует. И это не только из-за трудностей постановки такого эксперимента, но, по-видимому, из-за того, что такого влияния хлора на озон не существует. Иначе такой эксперимент давно поставили бы. Напомним, что атом хлора действительно может уничтожить молекулу озона по реакции:

$$Cl + O_3 \rightarrow ClO + O_2$$

Напомним, что озона в полярной стратосфере $\sim 10^{12}$ молекул/см^3, тогда как атомов хлора, которые могут высвобождаться из других соединений $\sim 10^9$ атомов/см^3. После того, как с озоном провзаимодействует весь хлор, концентрация озона уменьшится на 0.1%, а образовавшиеся молекулы ClO совершенно безвредны для озона. Поэтому первоначально предполагалось [17], что озон разрушается хлором посредством каталитического цикла с участием атомов O:

$$Cl + O_3 \rightarrow ClO + O_2$$
$$ClO + O \rightarrow Cl + O_2$$

Однако этот механизм не работает в условиях нижней стратосферы, где количество атомарного кислорода ничтожно мало. Поэтому был предложен так называемый хлорный димерный каталитический цикл [18]:

$$ClO + ClO + M \rightarrow Cl_2O_2 + M$$
$$Cl_2O_2 + h\nu \rightarrow Cl + ClOO$$
$$ClOO \rightarrow Cl + O_2 + M$$
$$2\times(Cl + O_3) \rightarrow ClO + O_2$$

Считается, что именно этот цикл дает основной вклад в разрушение озона.

Отметим, что сомнения в том, что хлорный димерный каталитический цикл реально работает в нижней стратосфере, были. Так, в экспериментальной работе [19] было показано, что сечение фотодиссоциации Cl_2O_2 слишком мало для образования озоновой дыры в полярной стратосфере. На осно-

вании этого был сделан вывод, что все предыдущие измерения сечения фотодиссоциации Cl_2O_2 неверны из-за методических ошибок. В то же время некоторые авторы склоняются к тому, что ошибочны именно выводы [19] и сечение фотодиссоциации Cl_2O_2 достаточно для образования озоновой дыры [20].

Однако не ясно, в силу каких причин не работает хлорный димерный каталитический цикл. Если справедлив вывод [19], что сечение Cl_2O_2 недостаточно для эффективной работы димерного цикла, то должно происходить сильное накопление димера в стратосфере, что не подтверждается наблюдениями. Другая причина может заключаться в том, что этот цикл является так называемым нуль циклом, при котором озон не уничтожается. Одним из возможных вариантов подобного цикла является распад молекулы ClOOCl под действием солнечного света на 2 молекулы ClO. Последний вариант, очевидно, и является нуль циклом. Однако в [21] и [22] показано, что при распаде ClOOCl выделяется атом хлора, и это доказывает, что распад ClOOCl происходит по схеме $Cl + ClO_2$. Однако мы предполагаем, что димерный цикл является все-таки нуль циклом из-за того, что разрушение молекулы ClOOCl может идти по следующей схеме:

$$ClOOCl + hv \rightarrow ClO^* + ClO$$

и далее:

$$ClO^* \rightarrow Cl + O$$

или

$$ClO^* + M \rightarrow Cl + O + M$$

При диссоциации ClOOCl УФ излучением одна из молекул должна принять избыток энергии, т.е. перейти в возбужденное состояние. При этом возможен распад возбужденной молекулы на атомы хлора и кислорода. Очевидно, что в результате разрушения димера и окиси хлора по указанной схеме содержание озона не изменится, т.к., с одной стороны, атомы хлора уничтожают молекулы озона (см. выше), а с другой стороны, происходит образование молекулы озона в результате тройных соударений:

$$O + O_2 + M \rightarrow O_3 + M$$

И этот механизм, являющийся так называемым нуль циклом, не противоречит экспериментальным “доказательствам”, утверждающим, что димерный цикл не является нуль циклом, а наоборот, является основным механизмом образования озоновой дыры.

Отметим, что в [19] указывается на возможность существования ClO*. Источником таких молекул считались загрязнения, появляющиеся в ходе эксперимента. Однако, если предположить, что источником таких молекул является фотодиссоциация ClOOCl, то это может привести к переоценке сечения ClOOCl в бóльшую сторону. В то же время, как мы видим, это все равно не спасет хлорную теорию.

Однако наиболее убедительное доказательство несостоятельности хлорной теории разрушения озона предоставило извержение филиппинского вулкана Пинатубо в 1991 г. Продукты извержения достигли стратосферы и только к 1993 г. облако от извержения исчезло. Одно из самых мощных извержений прошлого столетия привело к заметному уменьшению озона на всей планете, включая тропики и умеренные широты. Окиси хлора в умеренных и тропических широтах гораздо меньше, чем в полярных районах. По крайней мере, концентрация ClO много меньше, чем ~1ppb или $\sim 10^9$ молекул/см^3 в нижней стратосфере, необходимой для заметного уничтожения озона посредством хлорного димерного цикла. Высказывались мнения о роли серных окислов SO_2 и др. Однако, на наш взгляд, результат воздействия извержения вулкана Пинатубо на озон очевиден. Это вовсе не влияние аэрозоля на озон посредством гетерогенной химии и даже не каталитические циклы с участием серных окислов. Это, прежде всего результат уменьшения прозрачности атмосферы и ее охлаждения в масштабах всей планеты. В результате сжатия атмосферы относительная высота расположения максимума концентрации озона и максимума концентрации заряженных частиц уменьшается, что приводит к усиленному разрушению озона (см. следующий раздел).

Кроме того, в результате работы глобальной электрической цепи на верхней границе полярных стратосферных облаков накапливается положительный заряд, на котором усиленно разрушается озон [5,6]. При появлении ПСО и аэрозольных слоев происходит перераспределение заряда, при этом средняя высота заряда увеличивается, приближаясь к максимуму в распределении озона.

© Институт прикладной геофизики имени академика Е.К.Федорова ISSN 2304-7380

После исчезновения аэрозольных слоев, связанных с извержением вулкана Пинатубо увеличивается температура атмосферы, происходит ее расширение и озон восстанавливается. Такое восстановление озона зафиксировано после 1993 г.

ПРИЧИНЫ ПОЯВЛЕНИЯ ОЗОНОВЫХ “ДЫР” – ИЗМЕНЕНИЕ ДИНАМИКИ АТМОСФЕРЫ

Считается, что причиной появления озоновых дыр является антропогенное воздействие. Общепринятая точка зрения такова, что выбросы хлорфторуглеродов с конца 70-х – начала 80-х годов прошлого столетия привели к увеличению содержания хлорных соединений в полярной стратосфере и, как результат, к образованию озоновых дыр в южном полушарии и так называемых “мини-дыр” в северном. Это заключение привело к целому ряду серьезных мероприятий, заключению известного Монреальского протокола, и главное, к перестройке всей холодильной промышленности бывшего СССР и многих других стран.

А теперь давайте посмотрим на рис.4, где приведены данные измерений за 1979-2013 гг. общего содержания озона на антарктической станции Халли (75° ю.ш.) и средней температуры нижней стратосферы над этой станцией в в сентябре-декабре [18]. Как видно из рисунка, содержание озона контролируется температурой нижней стратосферы, т.е. динамикой, а совсем не хлорными соединениями.

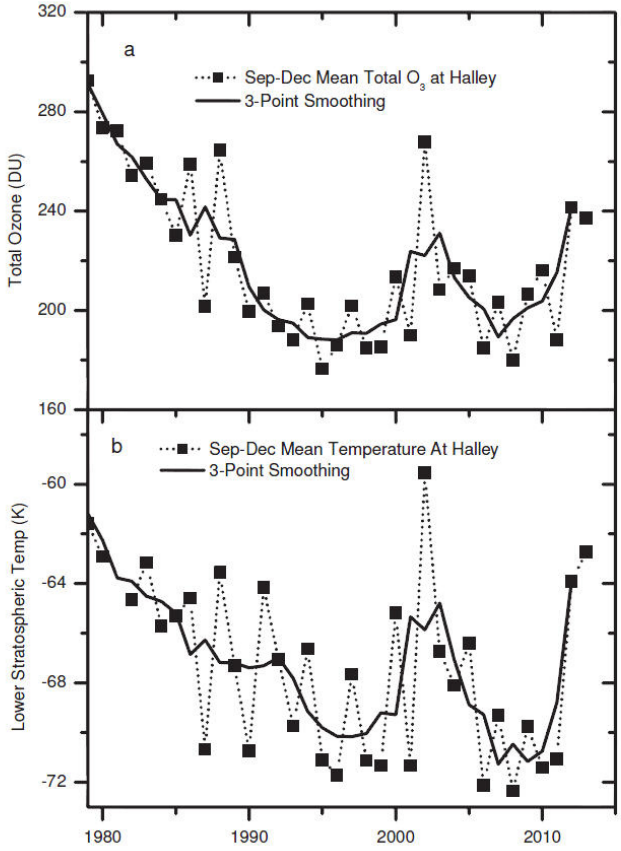

Рис. 4. Данные измерений за 1979–2013 гг. общего содержания озона на станции Халли (75 ю.ш.) в сентябре-декабре и средней температуры нижней стратосферы над этой станцией в указанный период времени согласно [11]. Символами указаны средние измерения за 4-х месячный период, сплошной линией показаны осредненные по 3 точкам данные.

Согласно [5], именно динамика ответственна за образование озоновых дыр: опускание воздушных масс внутри полярного вихря приводит к тому, что озон попадает в область высот максимальной скорости образования заряженных частиц, что приводит к усиленному распаду озона. При этом, чем ниже температура стратосферы, тем ниже опускается воздух и тем большее количество молекул озона распадается при участии заряженных частиц.

Указанный процесс демонстрируется рис. 5 [5], на котором приводится принципиальная схема образования озоновой депрессии, построенная на основе анализа полярных экспериментов. Опускание воздуха внутри полярного вихря приводит к тому, что в нижнюю стратосферу и верхнюю тропосферу опускается озон и другие соединения. Именно здесь из-за повышенной концентрации заряженных частиц и происходит усиленное разрушение озона, а также ряда других соединений (например HCl, $ClONO_2$ и др.). На этом же рисунке показано влияние полярных стратосферных облаков (ПСО) на изменения высотного профиля концентрации заряженных частиц в результате работы глобальной электрической цепи. Накопление заряженных частиц на верхней и нижней границах полярных стратосферных облаков приводит к сильной изрезанности высотного профиля озона, который разрушается на заряженных частицах.

Заметное изменение динамики полярной стратосферы начало происходить с начала 1980-х годов (рис. 1). Этот факт отмечается и исследуется в [23, 24]. Причиной, по мнению авторов этих публикаций, является рост волновой активности, вызванной изменением взаимодействия океан-атмосфера. Однако имеются и другие причины, влияющие на динамику стратосферы. Прежде всего, это уменьшение солнечной активности на протяжении почти сорока лет, начиная с 1980 г. Последнее означает рост интенсивности галактических космических лучей и, соответственно, увеличение концентрации заряженных частиц в стратосфере. На этот эффект накладываются сильные извержения вулканов и внезапные стратосферные потепления. Отметим, что мощнейшие извержения вулканов Эль-Чичон в 1982 и Пинатубо в 1991 гг. пришлись примерно на время максимумов солнечной активности, т.е. на те моменты времени, когда действие космической радиации ослаблено, и благодаря вулканам разрушение озона (см. выше) не ослабевает на протяжении почти 20 лет. После Пинатубо не было сравнимых по силе извержений, и содержание озона начинает восстанавливаться, испытывая вариации, связанные, по-видимому, с изменением солнечной активности (рис.2). Еще одна возможная причина – движение магнитных полюсов. Северный магнитный полюс с 1980 гг. движется от берегов Канады в направлении п-ва Таймыр, и к 2017 г. сместился почти на тысячу километров. Сейчас магнитный полюс находится недалеко от северного географического полюса. Смещение магнитного полюса влечет за собой, согласно [25], смещение зоны вторжения галактических космических лучей, изменение климата Арктики, а значит, и динамики стратосферы. Безусловно, нельзя исключить наличие и других причин, которые могут влиять на динамику атмосферы, но мы ограничились рассмотрением тех из них, которые, по нашему мнению, могут играть основную роль в изменении динамики полярной стратосферы.

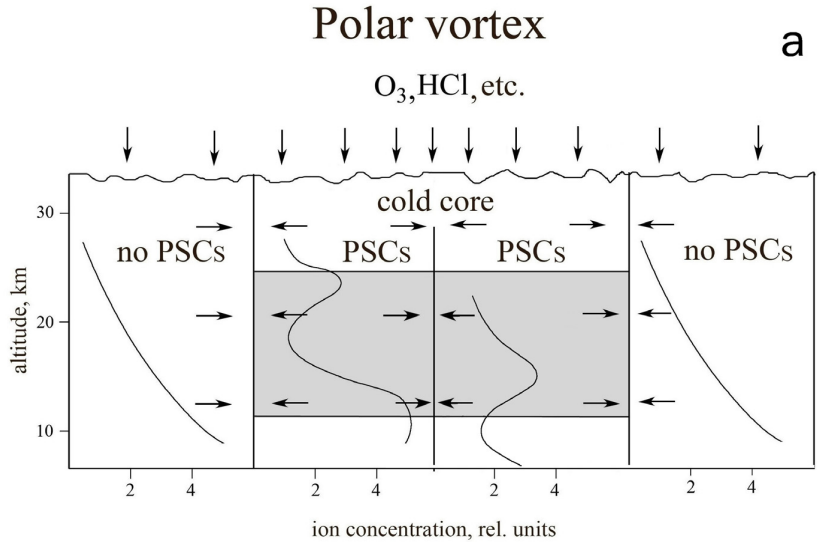

Рис. 5. Принципиальная схема формирования озоновой депрессии с участием заряженных частиц [5]. Опускание воздуха внутри полярного вихря приводит к опусканию озона и других соединений на высоты с повышенной концентрацией заряженных частиц, где происходит усиленное разрушение озона и ряда других соединений. Показаны высотные профили концентрации ионов внутри холодного ядра вихря, где присутствуют полярные стратосферные облака (ПСО), и на периферии вихря, свободной от ПСО. Затемненная область показывает высотный диапазон образования ПСО и эффект их влияния на концентрацию ионов в результате работы глобальной электрической цепи.

© Институт прикладной геофизики имени академика Е.К.Федорова ISSN 2304-7380

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, можно сделать вывод, что озоновые дыры появляются в результате разрушения озона на заряженных частицах в полярной стратосфере, причем ключевую роль в этом играет динамика стратосферы. Опускание воздуха, а вместе с ним молекул озона, в нижнюю стратосферу до высот повышенного образования заряженных частиц под действием галактических космических лучей, приводит к усиленному разрушению озона. Появление и эволюция озоновых дыр связаны с изменением динамики стратосферы с конца 70-х – начала 80-х годов прошлого столетия, вызванных практически одновременными уменьшением солнечной активности и мощными извержениями вулканов.

ЛИТЕРАТУРА

1. World Meteorological Organization, *Scientific Assessment of Ozone Depletion: 1998*., WMO Global Ozone Research and Monitoring project, Report 44, Geneva, 1999.
2. Ruderman M.A., Chamberlain G.W. Origin of the sunspot modulation of ozone: its implication for stratosphere NO injection. – Planet. Space Sci., 1975, 23, N 2, p. 247–268.
3. Paetzold H. K., Piscalar F., Zschorner H. Secular variation of the stratospheric ozone layer over middle Europe during the solar cycles from 1951 to 1972. – Nature, Phys. Sci., 1972, 240, p.106-107.
4. Александров Э.Л., Кароль И.Л., Ракипова Л.Р., Седунов Ю.С., Хргиан А.Х. Атмосферный озон и изменения глобального климата, 1982. – Ленинград, Гидрометеоиздат, 168 с.
5. Belikov Yu.E., Nikolayshvili S.Sh. 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 http://davidpublisher.org/index.php/Home/Article/index?id=26172.html
6. Беликов Ю.Е., Николайшвили С.Ш., 2015. Озоновые дыры: новый взгляд. Земля и Вселенная, 2, 27-39.
7. Беликов Ю.Е., Николайшвили С.Ш., 2012. Возможный механизм разрушения озона на ледяных кристаллах в полярной стратосфере. Метеорология и гидрология, №10, с.33-43.
8. Беликов Ю.Е., Николайшвили С.Ш. Влияние электризации ледяных кристаллов в полярной стратосфере на разрушение озона. // Гелиогеофизические исследования. 2013. №6. С. 35-52, http://vestnik.geospace.ru/index.php?id=257
9. Cole, Jr., R. K., and Pierce, E. T. (1965). Electrification in the Earth's atmosphere for altitudes between 0 and 100 kilometers. J. Geophys. Res. 70, 2735-2749.
10. Hayakawa, S. (1969). Cosmic Ray Physics. (Wiley-Interscience, New York) pp.8.
11. Lu, Q. B. 2015. New Theories and Predictions on the Ozone Hole and Climate Change. World Scientific Publishing Co., 285 pp.
12. Anderson, J. G., Brune, W. H., and Toohey D. W. 1991. "Free Radicals within the Antarctic Vortex: The Role of CFCs in Antarctic Ozone Loss." Science 251: 39-46.
13. Airborne Antarctic Ozone Experiment 1987 (AAOE-87). Available online: http://badc.nerc.ac.uk/.
14. Harrison R.G.; Alpin K.L. Atmospheric condensation nuclei formation and high-energy radiation. J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics 2001, 63, 1811 – 1819.
15. Aplin, K.L., Harrison, R.G., 2000. A computer-controlled Gerdien atmospheric ion counter. Review of Scientic Instruments 71 (8), 3037–3041.
16. SAGE III Ozone Loss and Validation Experiment 1999-2000 (SOLVE). http://espoarchive.nasa.gov/archive/arcs/solve/data/
17. Molina M.J. and Rowland F.S. Stratospheric sink for chlorofluoromethanes: chlorine atom – catalysed destrucion of ozone. Nature, 1974, 249, No. 5460, 810-812.
18. Molina L.T. and J.Molina M.J. Production of chlorine oxide (Cl2O2) from the self-reaction of chlorine oxide (ClO) radical. Journal of Physical Chemistry, 1987, Vol.91, Issue 2, 433-436.
19. Pope, F. D., J. C. Hansen, K. D. Bayes, R. R. Friedl, and S. P. Sander, 2007. Ultraviolet absorption spectrum of chlorine peroxide, ClOOCl. J. Phys. Chem. A, 2007, No.111, 4322– 4332.
20. Molina, M. J., A. J. Colussi, L. T. Molina, R. N. Schindler and T. L. Tso, 1990. Quantum yield of chlorine-atom formation in the photodissociation of chlorine. Chem. Phys. Lett., 173, 310-315.

21. Cox, R.A. and G. D. Hayman, 1988. The stability and photochemistry of dimers of the ClO radical and implications for Antarctic ozone depletion. Nature, 332, 796-800.
22. Jadin, E. A. 2011. “Stratospheric ‘Wave Hole’ and Interannual Variations of the Stratospheric Circulation in Late Winter.” Natural Science 3 (4): 259-67.
23. Jadin, E. A., Wei, K., Zyulyaeva, Yu. A., Chen, W., and Wang, L. 2010. “Stratospheric Wave Activity and the Pacific Decadal Oscillation.” J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics 72: 1163-70.
24. Беликов Ю.Е., Буров В.А., Котонаева Н.Г. , Лапшин В.Б. Сумеречный эффект влияния тонких высоких облаков и аэрозольных слоев на прозрачность атмосферы и климат. Международный симпозиум “Атмосферная радиация и динамика” (МСАРД – 2017) 27-30 июня 2017 г. С.Петербург-Петродворец, тезисы доклада, с.175-177, http://www.rrc.phys.spbu.ru/msard17/thesis.pdf
25. The Role of Halogen Chemistry in Polar Stratospheric Ozone Depletion February, Report from the June 2008 Cambridge, UK Workshop for an Initiative under the Stratospheric Processes and Their Role in Climate (SPARC)

OZONE HOLES AS A RESULT OF OZONE DESTRUCTION ON CHARGED PARTICLES

Ju. E. Belikov, S. Sh. Nikolaishvili

The formation of ozone holes in the polar stratosphere in winter and spring periods is considered. The ozone destruction occurs on the charged particles, which are formed in the polar stratosphere under the influence of the galactic cosmic rays. Inside the polar vortex the air masses, including the ozone molecules, descend to the heights, where the high concentration of the charged particles is observed. It is shown that the contribution of chlorine-containing compounds in ozone depletion is not a primary process, and the emergence of ozone holes in the late 1970s-early 1980s was due to the almost simultaneous solar activity decrease and volcanic eruptions intensity rise, which caused the stratosphere dynamics change.

KEY WORDS: OZONE HOLES, THE POLAR STRATOSPHERE, CHARGED PARTICLES.

© Институт прикладной геофизики имени академика Е.К.Федорова ISSN 2304-7380