

Антарктическая озоновая дыра — кто виноват?

Значительным научным открытием 2016 г. было признано установление факта начала «заживления» знаменитой антарктической озоновой дыры. Многие считают эту аномалию «раной», нанесенной озоновому слою нашей планеты деятельностью человека. Однако есть и другой, альтернативный взгляд на этот феномен, подкрепленный точными фактическими данными, но на сегодня известный лишь в узком научном кругу. Еще в конце прошлого века было высказано предположение, что такие нарушения в озоновом «покрывале» планеты могут быть вызваны естественными причинами и носить систематический характер. Красноярским исследователям удалось раскрыть механизм образования озоновых дыр с помощью оригинального метода слежения за движениями воздушных потоков

Ключевые слова: озон, антарктическая озоновая дыра, фреоны, гидрофторуглероды, Монреальский протокол, циркумполярные вихри.
Key words: ozone, antarctic ozone hole, freons, hydrofluorocarbons, the Montreal Protocol, polar vortex

© Р.Г. Хлебопрос, В.Б. Кашкин, 2017

Стратосферный озон задерживает ультрафиолетовое (короче 0,29 мкм) солнечное излучение, являясь важным климатическим и экологическим фактором. Так как УФ-излучение губительно действует на белки и нуклеиновые кислоты, уменьшение концентрации озона в атмосфере представляет опасность для всех биологических систем, включая человека.

Содержание озона в стратосфере меняется в течение года. Известно, что озон в большом количестве образуется в стратосфере тропических и, частично, средних широт за счет фотохимических реакций. Из тропиков весной озон переносится в сторону средних и высоких широт. Поэтому, например, в Южном полушарии годовой максимум озона наблюдается в октябре–ноябре. В период с января по июль концентрация озона достигает здесь своего минимума, так как с декабря по апрель средние и высокие широты хорошо освещаются Солнцем, что способствует разрушению озона при фотохимических реакциях деструкции, катализаторами которых могут выступать различные соединения, образующиеся в атмосфере или попадающие туда из разных источников.

В любом случае нарушение динамического равновесия процессов

Считается, что озоновый слой сформировался в атмосфере около 400–450 млн лет назад в результате постепенного накопления в ней свободного кислорода. К настоящему времени общая масса озона составляет всего $0,64 \times 10^6$ от массы всей атмосферы. Наибольшее количество озона содержится на высотах 19–25 км, т. е. в нижней стратосфере



ХЛЕБОПРОС Рем Григорьевич – доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник Института биофизики СО РАН (Красноярск), директор Международного центра исследований экстремальных состояний организма КНЦ СО РАН. Автор и соавтор более 20 научных публикаций, 9 монографий



КАШКИН Валентин Борисович – доктор технических наук, профессор Сибирского федерального университета (Красноярск). Автор и соавтор 130 научных публикаций, 4 монографий

образования и деструкции озона может ослабить экранирующую роль озонового слоя. Большой научный и общественный интерес к этой теме, возникший во второй половине прошлого века, был вызван тремя причинами: выявлением долговременной тенденции к уменьшению суммарного озона в XX в., сезонным появлением знаменитой антарктической озоновой дыры (АОД) в период «озонового максимума» (в октябре–ноябре) и возникновением гипотезы об антропогенном разрушении озоносферы.

В результате обсуждение озоновой проблемы вышло далеко за пределы научного сообщества, приобретая не только социальную, но и ярко выраженную экономическую «окраску». Она обросла легендами и заблуждениями и вызвала острую, зачастую совершенно «ненаучную» полемику.

Война с фреонами

На сегодня наиболее распространенная теория, объясняющая убыль озона, базируется на представлениях о его фотохимическом разрушении с участием веществ естественного и антропогенного происхождения. Еще в 1973 г. американские химики Ш. Роуланд и М. Молина в эксперименте обнаружили, что продукты распада хлорфторуглеродов (фреонов) могут разрушать озон. Этот результат, полученный «в пробирке», был практически сразу использован для объяснения процессов планетарного масштаба, в том числе возникновения антарктической озоновой дыры.

Уже через три года Всемирная метеорологическая организация запустила проект по глобальным исследованиям и мониторингу озонового слоя, а в 1985 г. была подписана Венская конвенция об его охране. Еще через два года в действие вступил Монреальский протокол к этой конвенции, предусматривающий контроль за озоноразрушающими соединениями и прекращение производства и использования фреонов. СССР, а затем и Российская Федерация присоединились к Венской конвенции и подписали Монреальский протокол, что закреплено в статье 54 Закона РФ «Об охране окружающей среды».

Запрет на производство и потребление озоноразрушающих веществ имел большие экономические и политические последствия. Руководители крупной химической промышленности, в частности, в США, вначале выступили против. Однако в 1986 г. запрет поддержал «киг» американской химической промышленности, концерн «Дюпон» (*DuPont*), который разработал новые хладагенты – гидрофторуглероды – как альтернативу фреонам. Начался «бум» по замене холодильников и кондиционеров, в результате чего компании, первыми начавшие применять новые хладагенты, получили громадные прибыли. Появилось даже мнение, что сама озоносберегающая политика была инициирована владельцами химических корпораций типа «Дюпон» с целью вытеснить национальных производителей и монополизировать международный рынок (Maduro & Schauerhammer, 1992).

Как же повел себя озоновый слой после введения в действие Монреальского протокола и его поправок, которые на сегодняшний день ратифицировали почти две сотни стран? До конца прошлого века стратосферный озон продолжал убывать в глобальном масштабе. Так, в умеренных широтах Южного полушария его концентрация уменьшалась примерно на 1% за каждые 10 лет, а Северного полушария – на 2,9% (Кашкин, Романов, Рублева, 2009). Однако с началом нового века ситуация изменилась: в 2005–2016 гг. рост содержания озона в атмосфере в Южном и Северном полушарии составил 1,52% и 1,97%, соответственно (Кашкин, Романов, Рублева, 2016).

В материалах Всемирной метеорологической организации за 2006 г. указывается, что прогноз состояния озонового слоя в целом остается неопределенным, так как существующие химические модели не позволяют точно воспроизвести наблюдаемые вариации общего содержания озона. Другими словами, несмотря на большое количество экспериментальных и теоретических исследований, реальные причины как убыли, так и наблюдаемого в настоящее время роста содержания озона до сих пор окончательно не установлены. Хотя для объяснения этого явления была выдвинута не одна гипотеза.

На Земле существует сеть из полутора сотен наземных озонметрических станций, но наиболее подробную информацию об озоновом слое дают искусственные спутники Земли. Они используют оптические методы регистрации озона, поэтому спутниковые данные о полярном озоне в зимнее время отсутствуют

От антропогенной гипотезы – к динамической

Символично, что официальное «открытие» озоновой дыры над Антарктидой состоялось в 1985 г. – в год подписания Венской конвенции, хотя имеются свидетельства, что она возникала там и в предыдущие десятилетия. АОД была признана результатом разрушения озона в фотохимических реакциях, в том числе с участием фреонов (Farman, Gardiner, Shanklin, 1985). В дальнейшем большинство исследований этого феномена было направлено на доказательство его антропогенного происхождения. Интересно, что в этих работах активно участвовала С. Соломон, которая вместе с коллегами из Массачусетского технологического института и сообщила в 2016 г. о признаках «оживления» антарктической озоновой дыры.

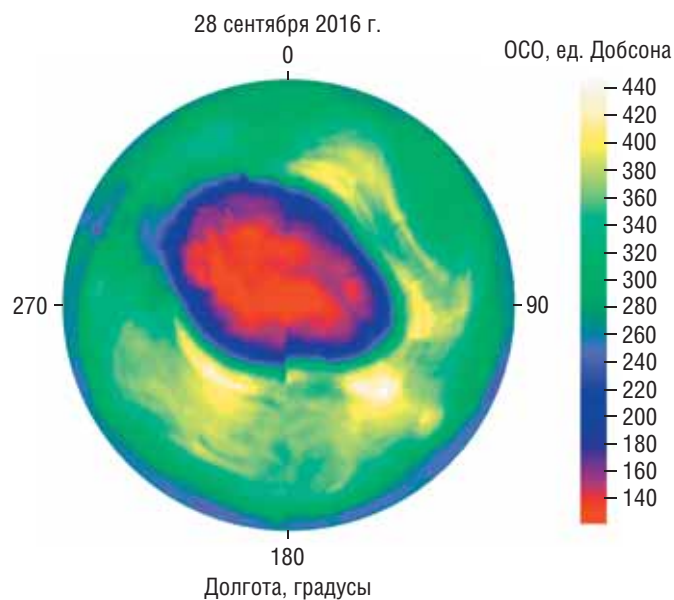
Современная статья Соломон и ее коллег основана на анализе результатов спутниковых и наземных измерений общего содержания озона (ОСО). Основываясь на расчетах с использованием математических моделей, описывающих химию полярного озона, поведение аэрозоля и вулканогенных газов, ученые сделали вывод, что с сентября 2000 г. в полярной зоне Южного полушария начало увеличиваться ОСО, произошли изменения в вертикальных профилях озона, а площадь антарктической озоновой дыры несколько уменьшилась за последние годы.

Со дня подписания Монреальского протокола прошло 30 лет, но при всей своей оптимистичности эта публикация показывает, насколько незначительны, применительно к АОД, успехи от его реализации. А главное, антропогенная химическая теория донныне не может ответить на вопрос: почему озоновая аномалия «появилась» в свое время в Южном полушарии, хотя фреоны вырабатывались преимущественно в Северном? И, наконец, почему антарктическая озоновая дыра вообще вновь появилась в том же 2016 г., хотя производство фреонов давно запрещено? Ведь при инициации Монреальского протокола было продекларировано, что она должна исчезнуть еще шесть лет назад.

И здесь мы подходим к альтернативной гипотезе возникновения антарктической озоновой дыры, согласно которой она является естественным образованием,



Озон в большом количестве образуется в стратосфере тропических широт за счет фотохимических реакций. Оттуда он переносится в сторону средних и высоких широт, где нисходящими движениями воздуха транспортируется в нижнюю стратосферу. Помимо мощного притока озона с экватора, в средних широтах образуется «свой» озон за счет фотохимических реакций, идущих на месте. А вот озона в районе полюса относительно меньше, причем он весь «импортного происхождения», так как солнечные лучи здесь падают под малым углом, а значительная часть озона, поступающего с экватора, успевает разрушиться в пути



В 2016 г. озоновая аномалия (углубление в озоновом слое) над Антарктидой сформировалась в районе 70–90° ю. ш., а ее площадь составила около 23,05 млн км² (для сравнения: площадь РФ – 17,12 млн км²). Район с минимальными значениями ОСО окружен «кольцом» с аномально высоким для Южного полушария содержанием озона. Данные на 28 сентября 2016 г. Изображение построено на основе спутниковой глобальной цифровой карты общего содержания озона (ОСО), полученной с помощью прибора OMI/AURA

обусловленным динамическими процессами в стратосфере (Кашкин, Рублева, Хлебопрос, 2007).

В центре вихря

В 1986 г. – за год до вступления в действие Монреальского протокола – было обнаружено, что общее содержание озона в период 1979–1982 г. в направлении от 44° ю. ш. к Южному полюсу оставалось практически неизменным с августа по ноябрь, а его снижение в сентябре вблизи Южного полюса компенсировалось увеличением в средних широтах (Stolarski, Schoeberl, 1986). Такие результаты свидетельствовали, что вариации ОСО вызваны динамическим перераспределением озона, а вовсе не химическими процессами. Однако это открытие, подрывавшее антропогенную теорию возникновения озоновых дыр, не было воспринято научным сообществом, и, судя по полному отсутствию на западе публикаций по динамической теории возникновения АОД, вопрос был закрыт. А спустя десятилетие Ш. Роуланду, М. Молине и Р. Круцену была присуждена Нобелевская премия по химии за установление роли газообразных хлорфторуглеродов в истощении озонового слоя Земли.

Но история динамической теории на этом не закончилась: ответить на ряд вопросов, связанных с проблемой образования озоновых дыр, удалось с помощью нового метода слежения за движениями воздушных потоков, предложенного красноярским исследователем В. Б. Кашкиным (Кашкин, Сухинин, 2001; Kashkin et al., 2002). Ведь озон, по сути, также можно представить в виде огромного «облака» над поверхностью Земли. И если мы будем измерять его содержание

в точках пространственной решетки с определенным временным интервалом (например, каждые сутки), то можем оценить угол его поворота, направление и скорость движения.

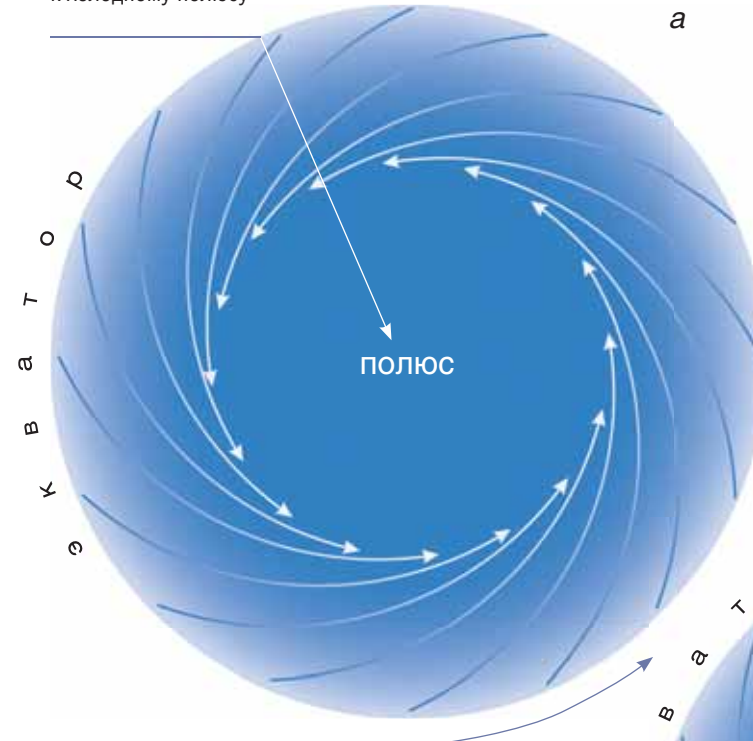
С помощью нового метода была исследована динамика озонового слоя в 2000 г., когда над Антарктидой наблюдалась рекордно большая озоновая дыра (Kashkin et al., 2002). Для этого использовались спутниковые данные о содержании озона по всему Южному полушарию, от экватора до полюса. Оказалось, что содержание озона было минимально в центре воронки так называемого циркумполярного вихря, которая образовалась над полюсом.

Что же представляет собой типичная антарктическая озоновая дыра, если мы взглянем на нее под таким углом? Это аномалия (углубление в озоновом слое) с минимальными значениями ОСО, окруженная «кольцом» диаметром несколько тыс. км с необычно высоким для Южного полушария содержанием озона. И все это по периферии огибает гигантский вихрь, вращающийся с запада на восток.

За период наблюдений максимальная площадь озоновой дыры менялась с течением времени. В 1979 г. (в начале регулярных спутниковых исследований озонового слоя) ее площадь составила 1,14 млн км², а затем ее размеры резко возросли. В 2000 г. площадь «дыры» достигла 29,86 млн км², а в 2015 г. – лишь немногим меньше.

Причинами роста АОД в период 1979–1984 гг. могли стать значительные изменения циркуляции атмосферы в Южном полушарии. Кроме того, в это время резко усилилась и активность антарктического вулкана

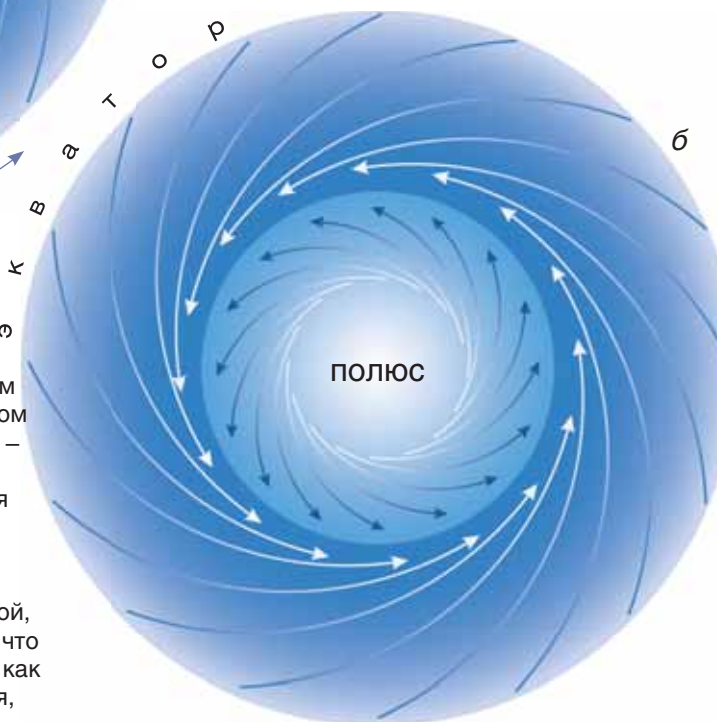
Стратосферные потоки движутся от теплого экватора к холодному полюсу



Движение стратосферных потоков с запада на восток происходит под воздействием силы Кориолиса, связанной с вращением Земли

Циркумполярные вихри образуются при движении стратосферных воздушных масс в меридиональном и широтном направлениях. В начале весны в Южном полушарии вблизи полюса образуется антициклон – область высокого давления. Воздушные потоки скатываются в стратосфере как с горки и движутся от полюса во все стороны, закручиваясь с запада на восток под воздействием силы Кориолиса, связанной с вращением Земли (а). В самые же холодные зимы «горка» становится особенно крутой, и стратосферные потоки скатываются так быстро, что возникает эффект, знакомый каждому, кто видел, как вода, стекая из ванны, начинает быстро вращаться, формируя вокруг отверстия характерную воронку. Нечто подобное происходит и в стратосфере. Когда потоки воздуха набирают большую скорость, центробежная сила начинает отжимать их от полюса к средним широтам. В результате формируется быстро вращающийся «вал» вихря в области средних широт. Концентрация озона внутри воронки резко падает – над полюсом образуется озоновая «дыра», а в средних широтах – область высокого содержания озона, соответствующая «валу» циркумполярного вихря (б).

Весной антарктическая стратосфера прогревается и воронка исчезает до новой холодной зимы



Стратосферные потоки движутся к средним широтам одновременно: от экватора и от полюса

САМ СЕБЕ УЧЕНЫЙ

Справедливость подхода к озоновым дырам как к природному феномену проверить несложно – с этим могут справиться даже школьники.

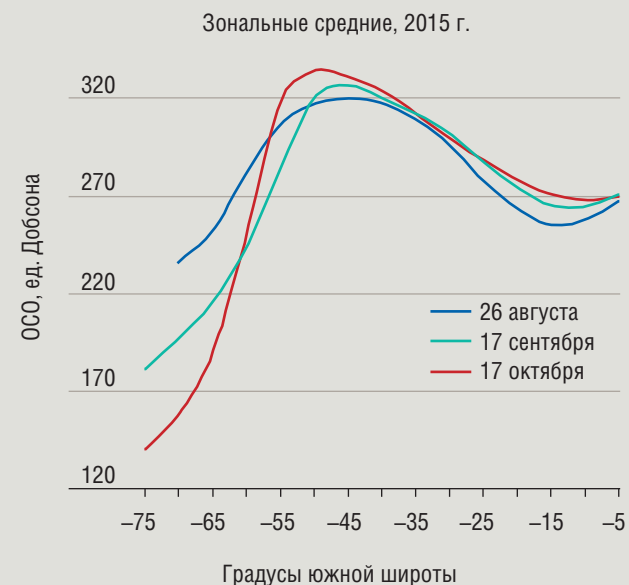
На сайте NASA наряду с цифровыми картами содержания озона приводятся так называемые зональные средние (*zonal means*). Площадь земного шара в направлении от одного полюса до другого разбивается на кольца шириной в 5°, для каждого кольца приводится среднее значение ОСО. Используя обычные программы (например, EXCEL) можно построить графики зависимости зональных средних от широты. Удобнее использовать среднюю широту кольца – это значение записано во второй строке.

		Координаты ю.ш., град.		-85	-80	-75	-70	-65	-60	-55	-50
				-85,5	-82,5	-77,5	-72,5	-67,5	-62,5	-57,5	-52,5
Sep	26	2015	2015,734	0	144,8	150	160	188	244	308	328
Sep	27	2015	2015,737	0	141,1	149	160	184	244	310	331
Sep	28	2015	2015,74	0	141,9	148	158	186	236	298	328
Oct	1	2015	2015,748	125,9	132,4	142	157	190	247	300	328
Oct	2	2015	2015,751	118,3	127,1	138	154	183	236	298	332
Oct	3	2015	2015,754	116,7	126,2	136	152	184	240	304	330

Таблица зональных средних значений (*zonal means*) общего содержания озона (ОСО) за 2015 г. В первых четырех столбцах отмечены месяц, день, год и доля этого дня по отношению к длине года. Средние значения рассчитаны для каждого из «колец», на которые разбита площадь земного шара. В верхней графе приведена географическая широта границы «колец», ниже – усредненное значение широты для каждого из них (минус означает Южное полушарие). ОСО представлено в ед. Добсона; ноль означает отсутствие данных. Данные NASA

Из графика, построенного на основе зональных средних за 26 августа, 17 сентября и 17 октября 2015 г., видно, что с течением времени количество озона уменьшается в полярной зоне, но возрастает в средних широтах. Налицо существование переноса озона – так образуется «озоновая дыра». Ее появление приходится на время максимального содержания озона в Южном полушарии. Частичная деструкция озона за счет воздействия озоноразрушающих веществ возможна, но этот процесс не является определяющим.

Аналогично можно построить график обратного процесса – заполнения озоновой дыры. Такие практически не востребованные научной общественностью данные могут стать основой для увлекательных научных исследований школьников. Например, можно изучать озон тропических, умеренных и высоких широт в обоих полушариях от 1978 г. до наших дней, влияние на озоновый слой геофизических явлений, например, крупных извержений вулканов. И конечно, одним из самых интересных объектов изучения остается озоновая дыра. Исследования помогут расширить кругозор школьников в области экологии, физики, химии, географии. Для работы достаточно быть любознательным и иметь компьютер с выходом в интернет



Образование озоновой дыры. График построен на основе зональных средних за 2015 г.



Заполнение озоновой дыры. График построен на основе зональных средних за 2015 г.

Эребус. Так, в сентябре–декабре 1984 г. там происходило до десятка и более извержений в сутки, а скорость выброса газов достигала 700 км/ч. Все это привело к поступлению в стратосферу большого объема продуктов извержения, способных вызывать разрушение озона (Зуев, Зуева, 2011).

Есть мнение, что главная методологическая ошибка разработчиков Монреальского протокола состоит в том, что важнейшая геофизическая и геохимическая проблема планеты была «отдана на откуп лабораторным химикам», которых поддерживали крупные химические корпорации.

Что же касается современных хладагентов – гидрофторуглеродов, то они давно известны как мощные парниковые газы, которые, в принципе, могут ускорить глобальное потепление. Поэтому в октябре 2016 г. страны, которые ратифицировали Монреальский протокол, договорились о расширении его действия. Похоже, история повторяется, и нам вновь придется заменять холодильники и кондиционеры на новые.

Литература

Кашкин В.Б., Рублева Т.В., Хлебопрос Р.Г. Озоновые дыры – «дети» стратосферных вихрей // НАУКА из первых рук. 2007. № 1. Т. 13. С. 70–77.

Кашкин В.Б., Романов А.А., Рублева Т.В. Исследование трендов спутниковых оценок общего содержания озона с использованием сингулярного спектрального анализа // Исследование Земли из космоса. 2009. № 4. С. 9–16.

Кашкин В.Б., Рублева Т.В., Хлебопрос Р.Г. Стратосферный озон: вид с космической орбиты. Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2015. 184 с.

Кашкин В.Б., Романов А.А., Рублева Т.В. Тренды общего содержания озона в 2005–2015 гг. по данным дистанционного зондирования // Оптика атмосферы и океана. 2016. Т. 29. № 9. С. 752–757.

Зуев В.В., Зуева Н.Е. Вулканогенные возмущения стратосферы – главный регулятор долговременного поведения озоносферы в период с 1979 по 2008 гг. // Оптика атмосферы и океана. 2011. Т. 24. № 1. С. 30–34.

Elliott S., Rowland F.S. Comment on “Further interpretation of satellite measurements of Antarctic total ozone” // Geophys. Res. Lett. 1988. V. 15. N 2. P. 196–197.

Molina M.J., Rowland F.S. Stratospheric sink for chlorofluoromethanes: Chlorine atom catalyzed destruction of ozone // Nature. 1974. V. 249. P. 810–812.

Solomon S., Ivy D.J., Kinnison D. et al. Emergence of healing in the Antarctic ozone layer // Science. 2016. 10.1126/science.aae0061.

Stolarski R.S., Schoeberl M.R. Further interpretation of satellite measurements of Antarctic total ozone // Geophys. Res. Lett. 1986. V. 13. N 12. P. 1210–1212.