

В.Б. КАШКИН, Р.Г. ХЛЕБОПРОС



КАШКИН Валентин Борисович — доктор технических наук, профессор Сибирского федерального университета (Красноярск)



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

ОЗООНОВЫЕ ДЫРЫ

«дети» стратосферных вихрей

Озон (O_3) представляет собой сравнительно редкую молекулярную форму кислорода, состоящую из трех атомов. Хотя озона в современной атмосфере немного — не более одной трехмиллионной от остальных газов, — роль его чрезвычайно велика: он задерживает жесткое ультрафиолетовое излучение (коротковолновую часть солнечного спектра), разрушающее белки и нуклеиновые кислоты. Поэтому до появления фотосинтеза — и, соответственно, свободного кислорода и озонового слоя в атмосфере — жизнь могла существовать только в воде.

Кроме того, стратосферный озон — важный климатический фактор, определяющий краткосрочные и локальные изменения погоды. Поглощая солнечное излучение и передавая энергию другим газам, озон нагревает стратосферу и тем самым регулирует характер планетарных тепловых и циркулярных процессов во всей атмосфере.

Неустойчивые молекулы озона в естественных условиях образуются и распадаются под действием различных факторов живой и неживой природы, причем в ходе длительной эволюции этот процесс пришел к некоторому динамическому равновесию. Скорость реакций деструкции озона зависит от катализаторов, в роли которых могут выступать как естественные атмосферные окислы, так и вещества, попадающие в атмосферу в результате природных катаклизмов (например, мощных извержений вулканов).

Однако во второй половине прошлого века было обнаружено, что катализаторами реакций разрушения озона могут также служить вещества промышленного происхождения, и человечество не на шутку обеспокоилось. Особенно общественное мнение взбудоражило открытие над Антарктидой так называемой озоновой «дыры».

«Дыра» над Антарктидой

Заметную убыль озонового слоя над Антарктидой — озоновую дыру — впервые обнаружили еще в 1957 г., в Международном геофизическом году. Настоящая же история ее началась через 28 лет со статьи в майском номере журнала *Nature*, где было высказано предположение, что причиной аномального весеннего минимума ОСО над Антарктидой служит промышленное (в том числе и фреонами) загрязнение атмосферы (Farman et al., 1985).

Было установлено, что озоновая дыра над Антарктидой возникает обычно раз в два года, держится около трех месяцев, а затем исчезает. Она представляет собой не сквозное отверстие, как может показаться, а углубление, поэтому более правильно говорить о «провисании озонового слоя». К сожалению, все дальнейшие исследования озоновой дыры в основном были направлены на доказательство ее антропогенного происхождения (Roap, 1989).

Сегодня существуют разные гипотезы относительно химических и динамических механизмов образования озоновых дыр. Однако в химическую антропогенную теорию

Один миллиметр озона

Атмосферный озон представляет собой сферический слой толщиной около 90 км над поверхностью Земли, причем озон в нем распределен неравномерно. Больше всего этого газа сосредоточено на высоте 26–27 км в тропиках, на высоте 20–21 км — в средних широтах и на высоте 15–17 км — в полярных областях.

Общее содержание озона (ОСО), т.е. количество озона в атмосферном столбе в конкретной точке, измеряется по поглощению и излучению солнечной радиации. В качестве единицы измерения используется так называемая единица Добсона (е. Д.), соответствующая толщине слоя чистого озона при нормальном давлении (760 мм рт. ст.) и температуре 0°С. Сто единиц Добсона соответствуют толщине озонового слоя в 1 мм.

Величина содержания озона в атмосфере испытывает суточные, сезонные, годовые и многолетние колебания. При среднем глобальном ОСО в 290 е. Д. мощность озонового слоя меняется в широких пределах — от 90 до 760 е. Д.

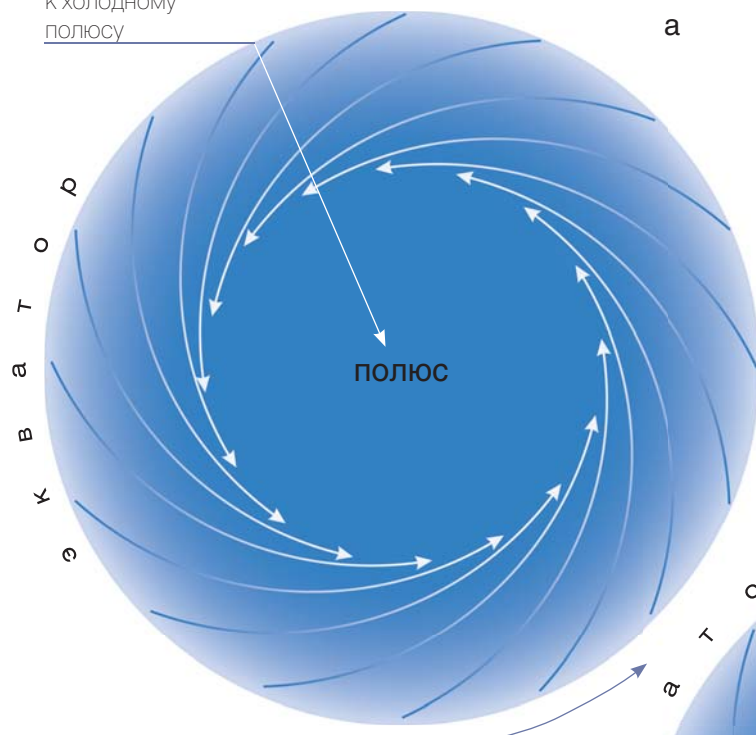
За содержанием озона в атмосфере следит мировая сеть из около ста пятидесяти наземных озонометрических станций, очень неравномерно распределенных по территории суши. Такая сеть практически не может регистрировать аномалии в глобальном распределении озона, даже если линейный размер таких аномалий достигает тысячи километров. Более детальные данные об озоне получают с помощью оптической аппаратуры, установленной на искусственных спутниках Земли.

Нужно отметить, что само по себе некоторое уменьшение общего содержания озона (ОСО) не является катастрофическим, особенно в средних и высоких широтах, потому что облака и аэрозоли также могут поглощать ультрафиолетовое излучение. В той же Центральной Сибири, где число облачных дней велико, отмечается даже дефицит ультрафиолета (около 45% от медицинской нормы).

не укладывается много известных фактов. Например, рост содержания стратосферного озона в отдельных географических регионах.

Вот самый «наивный» вопрос: почему дыра образуется в южном полушарии, хотя фреоны вырабатываются в северном, при том что неизвестно, имеется ли в это время воздушное сообщение между полушариями?

стратосферные потоки движутся от теплого экватора к холодному полюсу



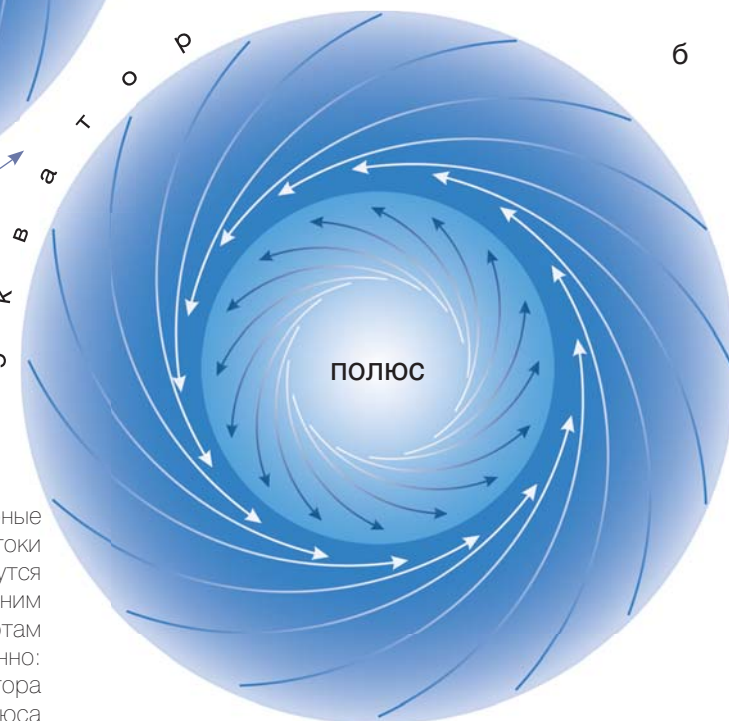
движение стратосферных потоков с запада на восток происходит под воздействием силы Кориолиса, связанной с вращением Земли

Ни одна из существующих теорий не опирается на ширококомасштабные детальные измерения ОСО и исследования процессов, происходящих в стратосфере. Ответить на вопрос о степени изолированности полярной стратосферы над Антарктидой, как и на ряд других вопросов, связанных с проблемой образования озоновых дыр, удалось лишь с помощью нового метода слежения за движениями воздушных потоков,

предложенного В. Б. Кашкиным (Кашкин, Сухинин, 2001; Kashkin et al., 2002).

Воздушные потоки в тропосфере (до высоты 10 км) с давних пор прослеживали, наблюдая за поступательными и вращательными перемещениями облаков. Озон, по сути, также представляет собой огромное «облако» над всей поверхностью Земли, и по изменениям его плотности можно судить о движе-

Циркумполярные вихри образуются над полушариями Земли благодаря движению стратосферных воздушных масс в меридиональном и широтном направлениях. В результате потоки воздуха «наматываются», как нити на веретено, на южное и северное полушария (а). В холодные зимы, когда стратосферные потоки над южным полушарием набирают большую скорость, центробежная сила начинает отжимать их от полюса к средним широтам. Над Южным полюсом образуется воронка, окруженная быстро вращающимся «валом» (б)



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

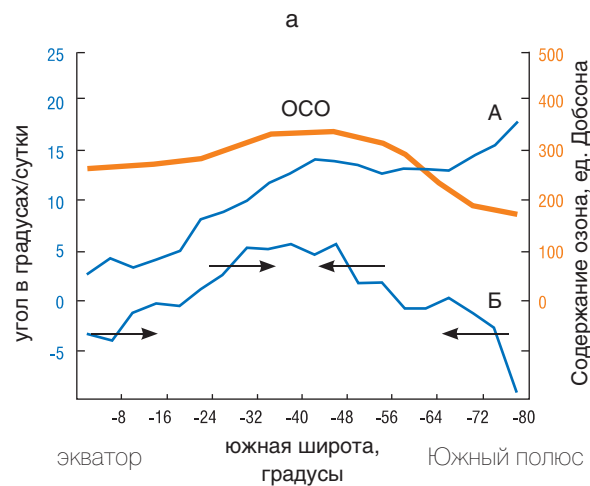
Заметную убыль озонового слоя над Антарктидой впервые обнаружили еще в 1957 г., а спустя три десятилетия вину за это возложили на промышленность

нии воздушных масс выше 10 км, — так же, как мы узнаем направление ветра, глядя на облачное небо в пасмурный день. Для этих целей плотность озона следует измерять в точках пространственной решетки с определенным временным интервалом, например, каждые 24 часа. Проследив, как изменилось поле озона, можно оценить угол его поворота за сутки, 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 плотности озона по всему южному полушарию, от экватора до полюса. В результате было установлено, что содержание озона минимально в центре воронки так называемого *циркумполярного вихря*, которая образовалась над полюсом, на чем мы подробно остановимся ниже. На основе этих данных была выдвинута гипотеза природного механизма образования озоновых «дыр».



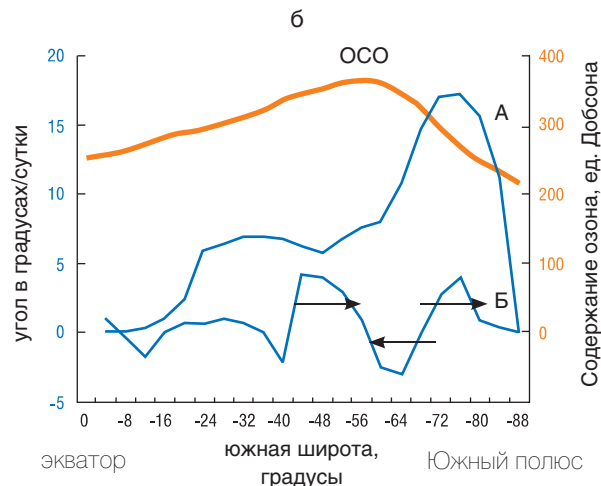


Самая большая известная на сегодня озоновая дыра сформировалась над Антарктидой в сентябре 2000 г. Положительные значения скорости зонального переноса на графиках означают поступление озона, а отрицательные — его отток. Видно, что во время образования дыры содержание озона возросло в средних широтах — в области вала циркумполярного вихря, куда он поступил как с экватора, так и из приполярной области (а). Затем массы озона начали устойчиво двигаться в сторону Южного полюса, максимум его содержания сместился в более высокие широты (б). Дыра начала заполняться, пока в конце концов не исчезла

Запрет на фреоны — кто выиграл?

В 1973 г. американцы Ш. Роуланд и М. Молина обнаружили, что атомы хлора, выделяющиеся из некоторых летучих искусственных химических веществ под действием солнечного излучения, могут разрушать стратосферный озон. Ведущую роль в этом процессе они отвели так называемым фреонам (хлорфторуглеродам), которые в то время широко использовались в бытовых холодильниках, в кондиционерах, в качестве газа-вытеснителя в аэрозолях и т.д. В 1995 г. эти ученые совместно с П. Крутценом были удостоены за свое открытие Нобелевской премии по химии.

На производство и использование хлорфторуглеродов и других веществ, разрушающих озоновый слой, стали налагаться ограничения. Монреальский протокол по веществам, разрушающим озоновый слой, который предусматривает контроль за 95 соединениями, в настоящее время подписали более 180 государств. В законе Российской Федерации об охране окружающей природной среды также есть специальная статья, посвященная охране озонового слоя Земли. Запрет на производство и потребление озоноразрушающих веществ

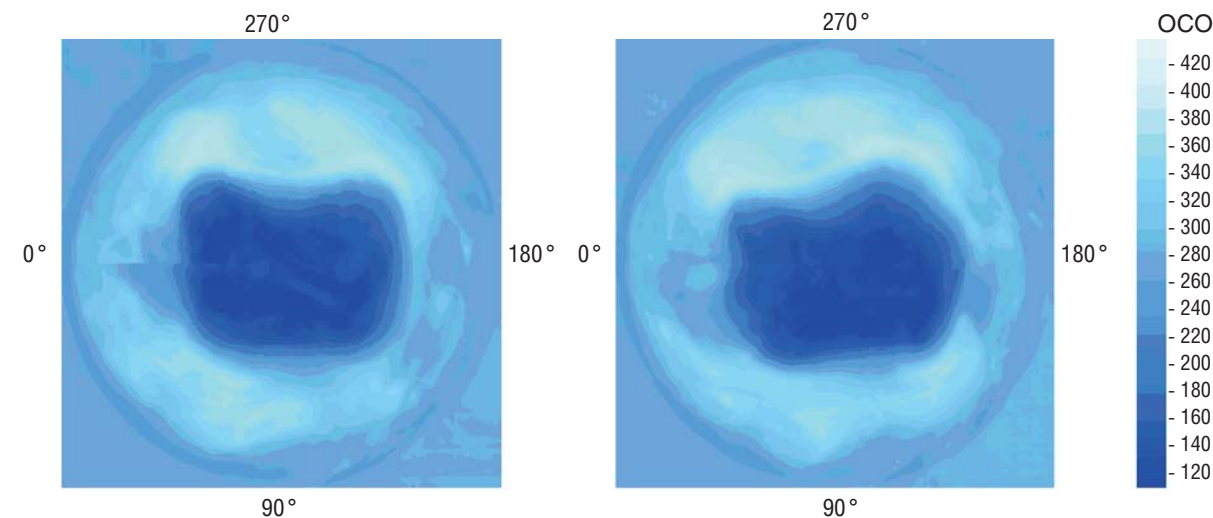


А — угловая скорость воздушных масс и озона
Б — скорость зонального переноса
ОСО — содержание озона;
стрелки указывают направление зонального переноса

По спутниковым данным за период с 1 по 20 сентября 2000 г. (а) и за период с 21 по 22 октября 2000 г. (б)

имел серьезные экономические и политические последствия. Ведь фреоны обладают массой достоинств: они малотоксичны по сравнению с другими хладагентами, химически устойчивы, негорючи и совместимы со многими материалами. Поэтому руководители химической промышленности, особенно в США, вначале были против запрета. Однако позднее к запрету присоединился концерн Дюпон, предложивший использовать в качестве альтернативы фреонам гидрохлорфторуглероды и гидрофторуглероды.

В западных странах начался «бум» с заменой старых холодильников и кондиционеров новыми, не содержащими озоноразрушающих веществ, хотя такие технические устройства имеют более низкий КПД, менее надежны, потребляют больше энергии и при этом более дорогостоящи. Компании, первыми начавшие применять новые хладагенты, оказались в выигрыше и получили громадные прибыли. Только в США убытки от запрета на хлорфторуглероды составили десятки, если не более, миллиардов долларов. Появилось мнение, что так называемая озоносберегающая политика могла быть инспирирована владельцами крупных химических корпораций с целью укрепить свое монопольное положение на мировом рынке.



долгота, градусы;
нулевая отметка соответствует
Гринвичскому меридиану

Космоснимок озоновой дыры в Южном полушарии, сформированной над Антарктидой в сентябре 2000 г. Она представляет собой область с пониженным ОСО (содержанием озона), окруженную вращающимся «валом» диаметром около 8000 км с высоким (до 460 единиц Добсона) ОСО

Глобальная динамика стратосферы: гипотеза

Циркумполярные вихри образуются при движении стратосферных воздушных масс в меридиональном и широтном направлениях. Как это происходит? На теплом экваторе стратосфера выше, а на холодном полюсе — ниже. Воздушные потоки (вместе с озоном) скатываются со стратосферы как с горки, и движутся все быстрее от экватора к полюсу. Движение с запада на восток происходит под воздействием силы Кориолиса, связанной с вращением Земли. В результате потоки воздуха как бы наматываются, как нити на веретено, на южное и северное полушария.

«Веретено» воздушных масс вращается в течение всего года в обоих полушариях, но более выражено в конце зимы и начале весны, потому что высота стратосферы на экваторе почти не меняется в течение года, а на полюсах она выше летом и ниже зимой, когда там особенно холодно.

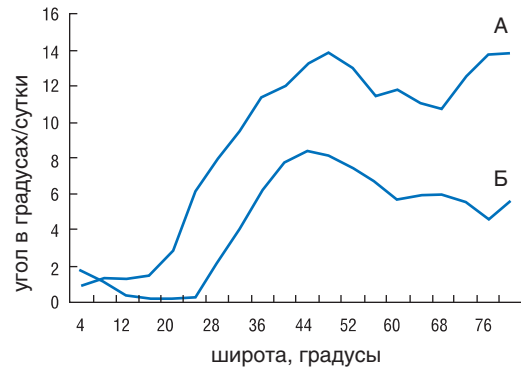
Слой озона в средних широтах создается за счет мощного притока с экватора, а также в результате фотохимических реакций, происходящих на месте. А вот озон в районе полюса обязан своим происхождением в основном поступлению с экватора и из средних широт, и его содержание там довольно низкое. Фотохимические реакции на полюсе, куда солнечные лучи падают под малым углом, идут медленно, а значительная часть озона, поступающего с экватора, успевает разрушиться в пути.

Но воздушные массы движутся так не всегда. В самые холодные зимы, когда стратосфера над полюсом очень низко опускается над поверхностью Земли и «горка» становится особенно крутой, ситуация меняется. Стратосферные потоки скатываются так быстро, что возникает эффект, знакомый каждому, кто наблюдал, как вода стекает через отверстие в ванне. Достигнув определенной скорости, вода начинает быстро вращаться, а вокруг отверстия образуется характерная воронка, создаваемая центробежной силой.

Нечто подобное происходит и в глобальной динамике стратосферных потоков. Когда потоки стратосферного воздуха набирают достаточно большую скорость, центробежная сила начинает отжимать их от полюса к средним широтам. В результате воздушные массы движутся от экватора и от полюса навстречу друг другу, что приводит к формированию быстро вращающегося «вала» вихря в области средних широт.

Обмен воздухом между экваториальной и полярной областями прекращается, озон с экватора и из средних широт на полюс не поступает. Кроме того, оставшийся на полюсе озон, как в центрифуге, отжимается к средним широтам

На основе спутниковых данных о плотности озона была выдвинута гипотеза естественного механизма образования озоновых дыр



В северном полушарии циркумполярный вихрь вращается почти в два раза медленнее, судя по сравнению среднемесячных значений угловых скоростей. Поэтому там не образуется воронка вихря с низким содержанием озона, т. е. озоновая дыра.

А — угловая скорость циркумполярного вихря в южном полушарии за период с 1 по 30 сентября 2000 г.
Б — угловая скорость циркумполярного вихря в северном полушарии за период с 1 по 29 марта 2000 г.

центробежной силой, поскольку он тяжелее воздуха. В результате концентрация озона внутри воронки резко падает — над полюсом образуется озоновая «дыра», а в средних широтах — область высокого содержания озона, соответствующая «валу» циркумполярного вихря.

Весной антарктическая стратосфера прогревается и поднимается выше — воронка исчезает. Воздушное сообщение между средними и высокими широтами восстанавливается, к тому же ускоряются фотохимические реакции образования озона. Озоновая дыра исчезает до новой особенно холодной зимы на Южном полюсе.

А что в Арктике?

Хотя динамика стратосферных потоков и, соответственно, озонового слоя в северном и южном полушариях в целом схожа, озоновая дыра время от времени возникает

только над Южным полюсом. Над Северным полюсом озоновых дыр не возникает, поскольку зимы там мягче и стратосфера никогда не опускается настолько низко, чтобы воздушные потоки набрали скорость, необходимую для образования воронки.

Есть и еще одно важное отличие. В южном полушарии циркумполярный вихрь вращается почти в два раза быстрее, чем в северном. И это неудивительно: Антарктида окружена морями и вокруг нее существует циркумполярное морское течение — по существу, вместе вращаются гигантские массы воды и воздуха. Иная картина в северном полушарии: в средних широтах там находятся материки с горными хребтами, и трение воздушной массы о земную поверхность не позволяет циркумполярному вихрю набрать достаточно большую скорость.

Однако в средних широтах северного полушария иногда появляются небольшие озоновые «дыры» иного происхождения. Откуда они берутся? Движение воздуха в стратосфере средних широт гористого северного полушария напоминает движение воды в мелком ручье с каменистым дном, когда на поверхности воды образуются многочисленные водовороты. В средних широтах северного полушария роль рельефа поверхности дна играют перепады температур на границе континентов и океанов, горных массивов и равнин.

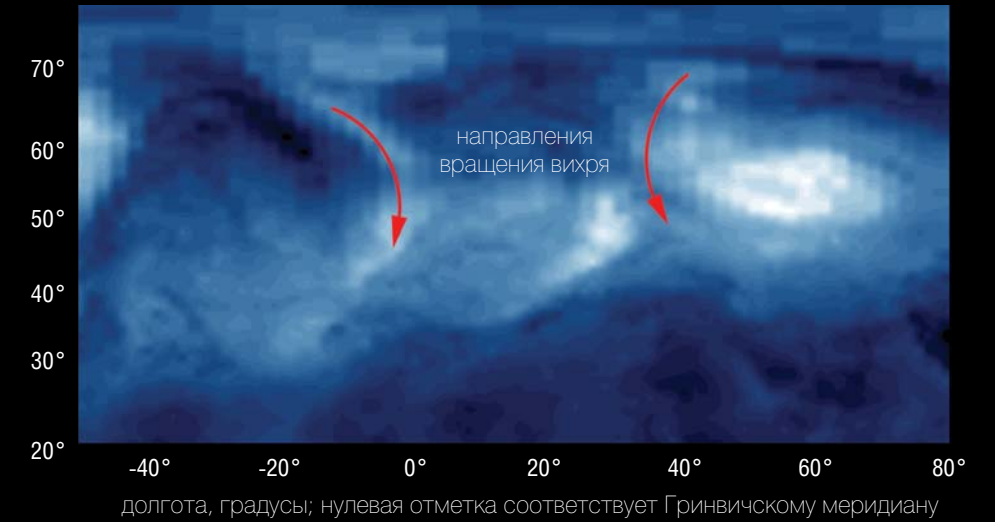
Резкая смена температуры на поверхности Земли приводит к формированию в тропосфере вертикальных потоков. Стратосферные ветры, наталкиваясь на эти потоки, создают вихри, которые могут вращаться в обоих направлениях с равной вероятностью. Внутри них появляются области с пониженным содержанием озона, то есть озоновые дыры, намного меньшие по размеру, чем на Южном полюсе. И нужно отметить, что такие вихри с разными направлениями вращения были обнаружены при первой же попытке.

Таким образом, динамика стратосферных воздушных потоков, которую мы проследили, наблюдая за облаком озона, позволяет дать правдоподобное объяснение механизма образования озоновой дыры над Антарктидой. По-видимому, подобные изменения озонового слоя, обусловленные аэродинамическими явлениями в стратосфере, имели место задолго до появления человека.

Все вышесказанное вовсе не означает, что фреоны и другие газы промышленного происхождения не оказывают разрушающего действия на озоновый слой. Однако ученым еще предстоит выяснить, каково соотношение природных и антропогенных факторов, влияющих на образование озоновых дыр, — делать поспешные выводы в столь важных вопросах недопустимо.

Вращающиеся воздушные вихри на космоснимке северного полушария видны благодаря различиям в содержании озона.

По спутниковым данным за 3 сентября 2001 г.



Светлым участкам соответствуют области с высоким содержанием озона, темным — с низким.

Космоснимок озонового слоя в северном полушарии, на котором видны два вихря, вращающиеся в разных направлениях. В восточном вихре содержание озона повышено, в западном — понижено (озоновая дыра). По спутниковым данным за 30 апреля 2003 г.

