

АНТАРКТИЧЕСКАЯ ОЗООНОВАЯ ДЫРА: СОРОК ЛЕТ СПУСТЯ

Первое обнаружение антарктической озоновой дыры случилось четыре десятилетия назад. Сегодня хорошо известно, что ее возникновение в конце зимы и начале весны над Антарктикой вызвано совокупным действием трех факторов: блокированием воздухообмена между полярными и средними южными широтами (явление циркумполярного вихря), а также разрушением озона, которое происходит двумя путями — на поверхности кристаллов облаков, появляющихся в нижней стратосфере при особо низких (порядка $-85^{\circ}\dots-75^{\circ}\text{C}$) температурах, и в химических реакциях с участием атомов хлора и брома. При этом эффективность двух последних, особенно третьего, факторов многократно усиливается в результате антропогенной деятельности (производства и применения содержащих хлор и бром хладагентов, распылителей, пенообразователей, растворителей и т. п.). С целью ослабления, а в идеале нейтрализации разрушения озонового слоя был принят Монреальский протокол, вступивший в силу 1 января 1989 года. По окончании льготного «втягивающего» периода, семью годами позже, с 1 января 1996 года, последовал запрет использования развитыми экономическими державами пяти фреонов (хлорфторуглеродов, ХФУ) первого поколения фреонов: ХФУ-11 (CFCl_3), -12 (CF_2Cl_2), -113 ($\text{C}_2\text{F}_3\text{Cl}_3$), -114 ($\text{C}_2\text{F}_4\text{Cl}_2$), -115 ($\text{C}_2\text{F}_5\text{Cl}$). Этот запрет был призван обеспечить снижение содержания хлора («хлорной нагрузки») в атмосфере. В этом году вышеупомянутому мораторию исполняется 30 лет — срок достаточный, чтобы подвести некоторые промежуточные итоги¹.

Хлора становится меньше

В соответствии с ожиданиями измерения свидетельствуют о падении в приземном воздухе концентраций попавших под запрет ХФУ-11 и -12 (см. рис. 1).

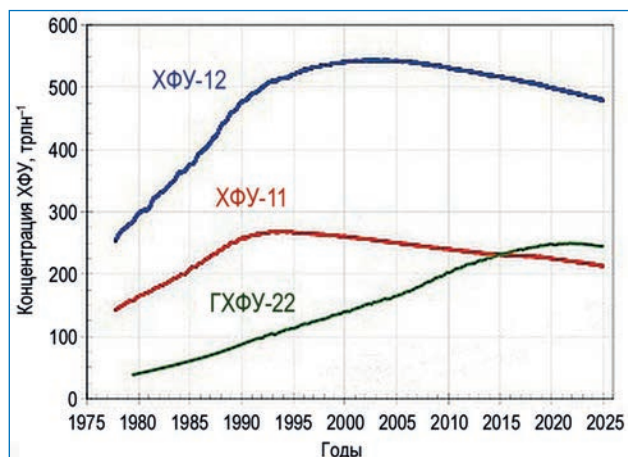


Рис. 1. Изменение концентраций ХФУ-11, -12 и -22 (трлн⁻¹, 1 трлн⁻¹ соответствует одной молекуле на 10^{12} молекул воздуха) в приземном воздухе. (Источник: <https://gml.noaa.gov/aggi/aggi.html>)

Концентрация имеющего «время жизни» в атмосфере $\tau \approx 45$ лет ХФУ-11 начала убывать раньше, чем концентрация более фотохимически пассивного ХФУ-12 ($\tau \approx 100$ лет)², а концентрация одного из их заменителей — ГХФУ-22 (CHF_2Cl , $\tau \approx 12$ лет) стала снижаться лишь

¹ Аналогичная оценка была предпринята к 20-летию юбилею запрета, см.: Киселев А.А., Кароль И.Л. Как поживаешь, антарктическая озоновая дыра? // Природа. 2016. № 10. С. 3–8.

² В 2024 году фреоны-11 и -12 обеспечивали 96 % антропогенной хлорной нагрузки, а на остальные ХФУ приходилось лишь 4% (<https://gml.noaa.gov/aggi/aggi.html>).

в последние годы, поскольку ограничения на его производство и использование были введены в рамках дополнения к Монреальскому протоколу только в 2010-е годы.

Вслед за ее компонентами начала уменьшаться и суммарная эффективная хлорная нагрузка (см. рис. 2, на котором сочетаются измеренные у поверхности значения и модельные прогностические оценки). Отмечается, что в период 2016–2020 годов наблюдаемая скорость снижения содержания тропосферного хлора из-за веществ, контролируемых Монреальским протоколом, составила $15,4 \pm 4,1$ трлн⁻¹ Cl год⁻¹. В то же время содержание тропосферного хлора из очень короткоживущих газов, источники которых в основном антропогенные и которые не контролируются Монреальским протоколом, увеличилось на $2,1 \pm 0,6$ трлн⁻¹ Cl год⁻¹. Общее содержание хлора, поступающего в стратосферу из контролируемых и неконтролируемых веществ, снизилось на 11,5 % в период между пиком 1993 года (3660 трлн⁻¹) и 2020 годом (3240 трлн⁻¹). Это долгосрочное снижение было в значительной степени обусловлено уменьшением содержания CH_3CCl_3 и ХФУ.

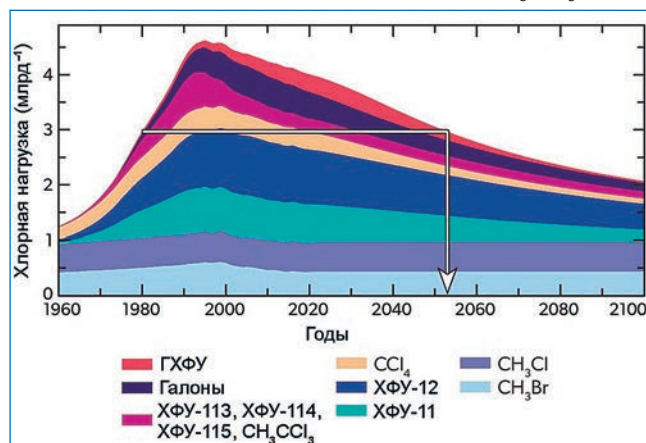


Рис. 2. Временная изменчивость суммарной эффективной хлорной нагрузки (млрд⁻¹, 1 млрд⁻¹ соответствует одной молекуле на 10^9 молекул воздуха) и вклада отдельных составляющих в нее. Белая линия со стрелкой отмечает момент, когда эффективная хлорная нагрузка вернется к значению 1980 года. (Источник: WMO. Executive Summary. Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2022, GAW Report No. 278, 56 pp.; WMO: Geneva, 2022)

Таким образом, можно констатировать, что главенствующая цель Монреальского протокола — создание устойчивой тенденции снижения хлорной нагрузки — в целом достигается, хотя спутниковый мониторинг помогает отследить ряд нарушений, в частности сохранение по сей день стабильных или немного растущих выбросов ХФУ-113, -114 и -115 в Восточной Азии и «неожиданные» выбросы ХФУ-11 начиная с 2012 года в восточном Китае.

...а озона немного больше

Обычно состояние озоновой дыры характеризуют площадью, которую она охватывает, и ее «глубиной», представляющей собой минимальное значение общего содержания озона (ОСО). При этом климатической нормой считается величина ОСО, равная 220 е. Д., и дыра появляется тогда, когда текущее значение ОСО «не дотягивает» до этой нормы.

О поведении обеих вышеупомянутых характеристик можно судить, обратившись к рис. 3.

Долгосрочная тенденция свидетельствует о медленном восстановлении озонового слоя: площадь дыры уменьшается, а минимальные значения ОСО растут (см.

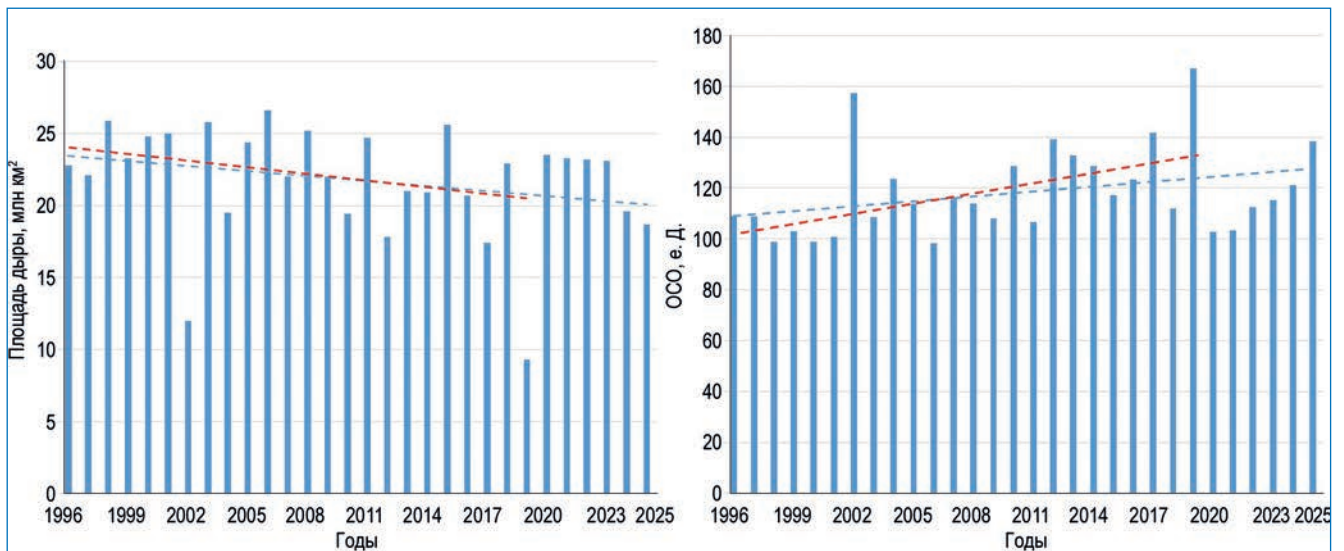


Рис. 3. Многолетние изменения площади и «глубины» озоновой дыры в период 1996–2025 годов. Слева: средняя за период с 7 сентября по 13 октября каждого года площадь озоновой дыры. Справа: среднее за период с 21 сентября по 16 октября каждого года минимальное значение ОСО в озоновой дыре. Пунктирными линиями показаны линейные тренды за периоды с 1996 по 2025 год (синий цвет) и с 1996 по 2019 год (красный цвет). (Источник: <http://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/meteorology/>)

синий пунктир на рис. 3). То, что это происходит медленно, не должно вызывать удивления: некогда попавшие в атмосферу ХФУ-11 и -12 и задерживающиеся в ней на десятилетия образуют достаточно длинный шлейф. А вот что стало неприятной неожиданностью, так это состояние озоновой дыры в 2020-м и в последующие годы, когда ее площадь снова оказалась примерно в полтора раза больше площади Антарктиды, а минимум ОСО едва переваливал за отметку 100 е. Д. Столь резкое отклонение не изменило общее направление тренда на восстановление озонового слоя, но замедлило его (ср. наклоны синего и красного пунктиров на рис. 3).

Содержание озона над Антарктидой зависит главным образом от подверженной значительной сезонной и межгодовой изменчивости циркуляции Брюера–Добсона, при которой тропический тропосферный воздух поднимается

в стратосферу, а затем, опускаясь, движется к полюсам. Этот процесс прерывается весной, когда возникший циркумполярный вихрь блокирует поступление богатых озоном воздушных масс в южную полярную область, при этом от мощности циркумполярного вихря зависит не только продолжительность его существования, но и температурный режим над ней. Простой расчет показывает тесную связь между состоянием озоновой дыры и температурой антарктической стратосферы: минимум ОСО и температура совпадают по фазе (коэффициент корреляции $R = 0,926$), а площадь озоновой дыры и температура находятся в противофазе ($R = -0,805$), см. рис. 4.

Специалисты «зрят в корень»

Особенности формирования озоновых дыр вообще и 2020–2022 годах в частности стали предметом

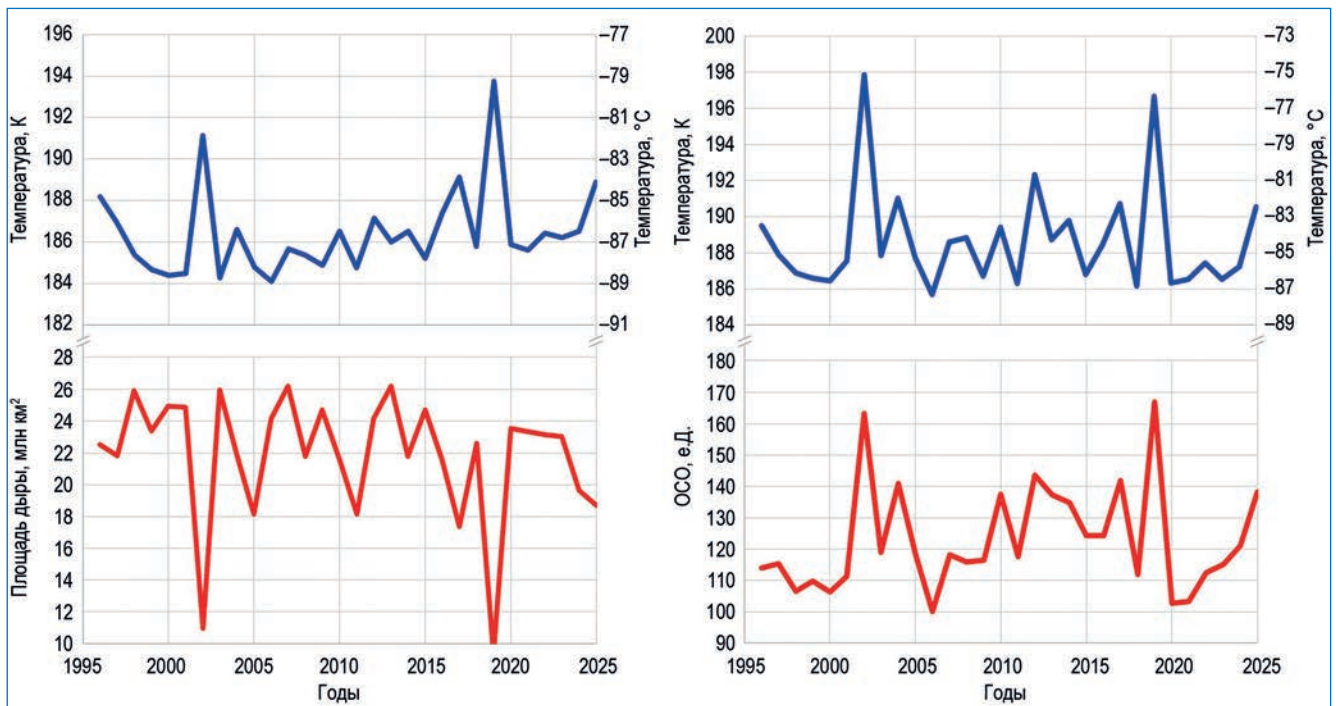


Рис. 4. Изменения площади озоновой дыры и температуры антарктической стратосферы. Слева: средние за период с 7 сентября по 13 октября каждого года температура и площадь озоновой дыры. Справа: средние за период с 21 сентября по 16 октября температура и минимум ОСО. Температура определялась на уровне 70 гПа (около 18 км). (Источник: <http://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/meteorology/>)

изучения и обсуждения. Так, Служба мониторинга атмосферы Copernicus (CAM5) отмечает, что в отличие от типичной ситуации, когда дыра начинает уменьшаться в течение октября и полностью исчезает в ноябре, дыры 2020–2022 годов оставались больше обычных на протяжении всего ноября и полностью исчезли во второй половине декабря. По словам директора CAM5 В.-А. Пеша (V.-H. Peuch), эти три года характеризовались сильными вихрями и низкими температурами, что привело к последовательным крупным и продолжительным эпизодам образования озоновых дыр.

В работе Тихопада и др. (Tichopád D. et al. Evaluation of factors affecting total ozone column and its trend at three Antarctic stations in the years 2007–2023 // Atmospheric Chemistry and Physics. Vol. 26. P. 1751–1768), посвященной исследованию тенденции изменения ОСО и атмосферных факторов, влияющих на его изменчивость на трех антарктических станциях (Марамбио, Тролль/Троллауген и Конкордия) в период 2007–2023 годов, изменчивость полярного вихря и связанные с ним динамические процессы также были определены как ключевые факторы образования необычно больших антарктических озоновых дыр в 2020–2023 годах.

Х. Хе и др. (He H., Chipperfield M.P., Dhomse S.S., Feng W., Chang S., Li Y., Weber M., Heddell S. Analysis of Antarctic ozone trends from 1979 to 2023, EGUsphere [preprint], <https://doi.org/10.5194/egusphere-2026-560>, 2026). Для оценки тенденций изменения уровня озона над Антарктидой с 1979 по 2023 год применили множественную линейную регрессию с использованием индикаторов, отражающих ряд процессов, включая, наряду с хлорной нагрузкой, циркуляцию Брюера–Добсона, Эль-Ниньо — Южное колебание, квазидвухлетнее колебание, антарктическую осцилляцию, 11-летний солнечный цикл и извержения вулканов (в виде аэрозольной оптической толщины). Их анализ показал, что в долгосрочной перспективе эволюция антарктического озона отражает взаимодействие множества процессов, при этом динамические факторы оказывают особенно сильное влияние на закономерности восстановления. Авторы указывают, что после установления контроля за озоноразрушающими веществами динамические процессы стали играть все более важную роль в процессах восстановления озона в Антарктиде. Среди прочих факторов воздействие вулканических аэрозолей, особенно после извержения Пинатубо (1991 год) приводит к существенным (до –40 е. Д. за несколько лет) потерям озона, остальные вносят меньший вклад.

Как известно, образование озона всегда происходит в освещенной атмосфере, поэтому в зимний период поле его концентрации над Антарктидой почти полностью зависит от интенсивности переноса воздушных масс циркуляцией Брюера–Добсона. Однако вместе с озоном сюда прибывают и хлор- и бромсодержащие компоненты воздуха. И после формирования циркумполярного вихря они начинают уничтожение молекул озона, продолжающееся вплоть до момента разрушения вихря. Было подсчитано, что один атом хлора может уничтожить до 100 тыс. молекул озона. Вышеуказанное ослабление хлорной нагрузки обеспечивает снижение эффективности разрушения озонового слоя и тем самым способствует его восстановлению.

... и сохраняют сдержанный оптимизм

Очевидно, что главным стимулом тщательного изучения процессов, значимо влияющих на формирование антарктической озоновой дыры, является насущная по-

требность успешно прогнозировать, как будет эволюционировать озоносфера Земли в обозримом будущем. Конечно, однозначных, «с точностью до миллиметра», оценок ждать не приходится, поскольку всякий такой прогноз зависит не только от уровня наших сегодняшних знаний, но также и от множества политических и хозяйственных решений, которые будут приняты и реализованы в ближайшие годы и десятилетия. В климатологии при прогнозировании будущих климатических изменений используют набор, состоящий из нескольких десятков сценариев, описывающих различные варианты антропогенного воздействия вплоть до конца XXI века. Такой подход позволяет установить предельные рамки вероятных изменений ключевых климатических характеристик и выделить наиболее правдоподобные прогностические оценки.

Аналогичный способ был применен для прогноза будущего поведения антарктической озоновой дыры (см. рис. 5). В ходе модельных расчетов предполагалось соблюдение положений Монреальского протокола и его дополнений, а также увеличение концентрации парниковых газов в соответствии со сценариями SSP1-2.6, SSP2-4.5 или SSP3-7.0 (слабое, среднее или сильное климатическое воздействие соответственно).

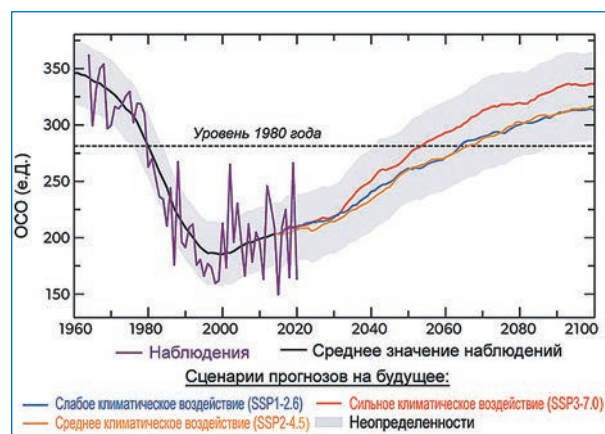


Рис. 5. Многолетние изменения среднего значения ОСО в Антарктиде (на широтах от 70° ю. ш. до 90° ю. ш.) в октябре. Неопределенность, представляет собой 1-σ стандартное отклонение относительно среднего значения. (Источник: WMO. Executive Summary. Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2022, GAW Report No. 278, 56 pp.; WMO: Geneva, 2022)

Оглядываясь назад, можно констатировать, что прогноз сроков восстановления ОСО до уровня 1980 года не претерпел серьезных изменений. Как и ранее, возврат величины ОСО на «додырочный» уровень ожидается приблизительно к середине века, но есть нюансы в зависимости от выбираемых человечеством приоритетов в принципах и методах хозяйствования. Иллюстрирующая наличие неопределенности в даваемом прогнозе широкая серая полоса на рис. 5 еще раз напоминает, что к нему нельзя относиться как «к истине в последней инстанции».

Неподвластные человеческой воле динамические процессы, безусловно, продолжают сказываться на состоянии антарктической озоновой дыры в течение нескольких ближайших десятилетий. Однако исследователи из Службы мониторинга атмосферы Copernicus уверены, что после того, как концентрации озоноразрушающих веществ в стратосфере вернуться к доиндустриальному уровню, озоновые дыры больше не будут наблюдаться независимо от силы полярного вихря и температурных условий. Дело за малым: теорию должна подтвердить практика.

А.А. Киселев (ГГО им. А.И. Воейкова)