

## ДЕФИЦИТ ОЗОНА НАПОМИНАЕТ О СЕБЕ

Термин «озоновая дыра», предложенный в 1930-е годы С. Чепменом и получивший спустя полвека широкое распространение, обычно ассоциируется с Антарктикой. Как известно, именно там ежегодно весной в течение нескольких последних десятилетий образуется брешь в озоновом слое — резко уменьшается общее содержание озона (ОСО)<sup>1</sup>. С целью тщательного и всестороннего изучения этого феномена ведущими странами на другом конце планеты организованы регулярные наблюдения за ним. Повышенное внимание к озону, одному из многих компонентов атмосферного воздуха, обусловлено его исключительной способностью поглощать жесткое солнечное ультрафиолетовое излучение<sup>2</sup>, губительное для человека, а также для многих представителей земной фауны и флоры.

Исследования, проведенные в конце прошлого столетия, показали, почему Антарктиде принадлежит «эксклюзивное право на обладание озоновой дырой». Причина — в сочетании трех факторов. Первый из них — интенсивное, растущее год от года (вплоть до 1990-х) загрязнение атмосферы рукотворными химикатами, содержащими атомы хлора и брома, — фреонами и галонами, использовавшимися в качестве хладагентов, пенообразователей, распылителей, эффективных средств при пожаротушении и пр. Оказавшись в атмосфере, эти химикаты разрушаются в химических реакциях

и под действием солнечного света, отправляя при этом в самостоятельную жизнь вышеупомянутые атомы хлора и брома, которые включаются в разрушающие озон каталитические циклы реакций. Согласно оценкам, например, один атом хлора может поспособствовать уничтожению до ста тысяч молекул озона.

Второй фактор заключается в специфике динамики атмосферных воздушных масс. Весной над Антарктидой образуется так называемый циркумполярный вихрь, представляющий собой вращение этих масс вдоль широтного круга вокруг полюса. Специалисты знают, что образование озона в химических реакциях происходит только в освещенной атмосфере. Поэтому зимой и отчасти весной, то есть во время полярной ночи, этот процесс практически не работает и источником озона в антарктической атмосфере служит его приток из более северных широт в результате крупномасштабного меридионального переноса воздуха. Но с появлением мощного циркумполярного вихря этот источник оказывается заблокированным.

Третий фактор проявляется при установлении в атмосфере очень низких ( $-78\text{ }^{\circ}\text{C}$  и ниже) температур, при которых происходит образование особого вида полярных облаков. Эти облака состоят из кристаллов, на поверхности которых протекают озоноразрушающие гетерогенные химические реакции.

Таким образом, появление дыры обусловлено продолжительным (несколько десятков дней) интенсивным распадом молекул озона в химических реакциях при одновременном отсутствии их поступления в изолированную область атмосферы. Нелишне отметить, что для

<sup>1</sup> ОСО — суммарное количество молекул озона в атмосферном столбе с площадью основания  $1\text{ см}^2$ . Измеряется в единицах Добсона ( $1\text{ е.Д.} = 2,69 \cdot 10^{16}$  молекул озона/ $\text{см}^2$ ).

<sup>2</sup> Излучение на длинах волн  $200\text{--}315\text{ нм}$  ( $1\text{ нм} = 1 \cdot 10^{-9}\text{ м}$ ).

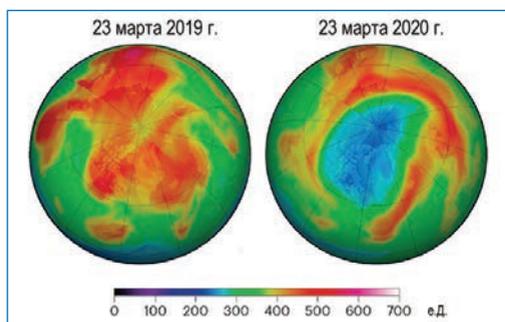


Рис. 1. Общее содержание озона 23 марта 2019 и 2020 годов (е.Д.) в Арктике (<https://arctic.ru/ecology/20200402/936037.html>)

возникновения озоновой дыры необходимо совокупное действие всех трех факторов, а ее глубина и срок существования различны год от года и определяются метеос условиями и мощностью циркумполярного вихря. Очевидно, выполнение всех перечисленных условий едва ли возможно в других природно-климатических зонах. За одним исключением. Конечно, речь идет об Арктике. Однако до последнего времени и здесь озоновых дыр не случилось. Да, некоторые их подобию наблюдалось в 1997 и 2011 годах, когда потери озонового слоя достигали 20 %<sup>3</sup>, но все же это была лишь «генеральная репетиция». «Премьера» состоялась девятью годами позже — в 2020 году. Событие это лишь мельком было отмечено СМИ. Тем не менее оно в силу его значимости достойно более подробного освещения.

Сегодня, по горячим следам, невозможно нарисовать полную картину арктической озоновой дыры-2020: публикации специалистов — непосредственных участников наблюдений, содержащие анализ произошедшего, появятся, вероятно, лишь через несколько месяцев. Посему довольствуемся доступной экспресс-информацией.

Рис. 1 позволяет сравнить состояние озонового слоя над Арктикой, имевшее место 23 марта в 2020 и 2019 годах. Если в марте 2019 года ОСО было близко к среднестатистической норме (400–420 е.Д.), то годом позже, «на пике» развития дыры, оно оказалось значительно меньше, а площадь дыры составила около 6 млн км<sup>2</sup> — «три территории Гренландии».

Абсолютные минимумы ОСО представлены на рис. 2. На нем каждому десятилетию соответствуют две линии, демонстрирующие, соответственно, наибольшее и наименьшее из десяти минимальных значений ОСО, измеренных в каждый из календарных дней года этого десятилетия. Минимумы прошедшего марта (черная линия) составили 220–240 е.Д., и столь низкие значения ранее были зафиксированы только однажды, в 1990-е.

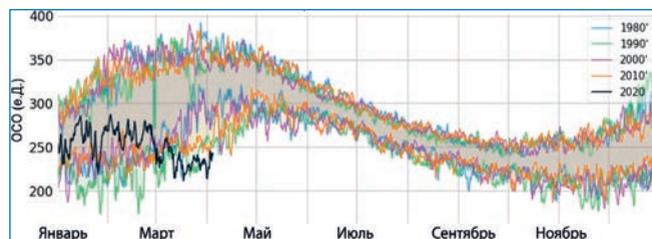


Рис. 2. Наибольшие и наименьшие минимальные значения ОСО по десятилетиям (<https://atmosphere.copernicus.eu/cams-tracks-record-breaking-arctic-ozone-hole>)

<sup>3</sup> Подробный анализ состояния озонового слоя в Арктике весной 2011 г. можно найти в статье: *Manney G. et al. Unprecedented Arctic ozone loss in 2011 // Nature. 2011. V. 478. P. 469–475, doi:10.1038/nature10556.*

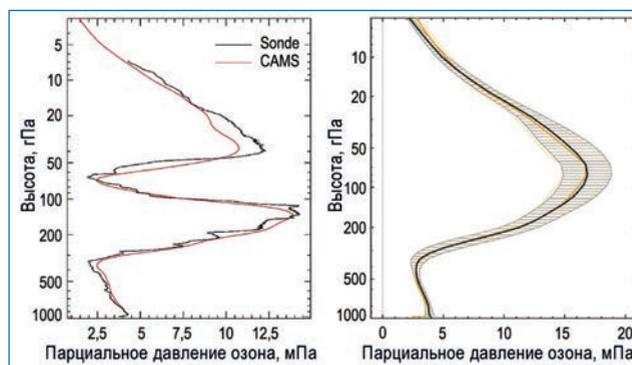


Рис. 3. Вертикальные профили парциального давления озона (мПа), измеренные 26 марта 2020 года (слева, по данным озонозонда (черная линия) и ассимиляции (красная линия)) и мартовские средние за 2003–2019 годы (штриховкой показано стандартное отклонение 1σ) на станции Нью-Олесунн (78°55'30" с.ш., 11°55'20" в.д.) (<https://atmosphere.copernicus.eu/cams-tracks-record-breaking-arctic-ozone-hole>)

Сопоставление вертикальных озонных профилей, снова «на пике» развития дыры (см. рис. 3), показывает, что основные потери озона, вплоть до 90 %, произошли на уровнях, близких к 70 гПа (около 18 км), то есть в слое 15–20 км, в котором его содержание максимально. Такое положение характерно для формирования озоновых дыр на обоих полюсах. И оно, естественно, существенно сказывается на величине ОСО.

Состояние озонового слоя над Арктикой весной 2020 года известный специалист М. Дамерис (M. Dameris) из Немецкого аэрокосмического центра (German Aerospace Center) назвал «первым появлением настоящей озоновой дыры над Северным полюсом за всю историю наблюдений»<sup>4</sup>. Возникает закономерный вопрос: почему данный феномен не проявлялся в Арктике раньше, а произошел именно сейчас? Ответить на него помогает опыт, накопленный при изучении дыры антарктической: ведь образование и эволюция обеих дыр подчинены одним и тем же причинно-следственным механизмам. Антарктида — огромный постоянно действующий «холодильник» Земли. Этим обстоятельством определяется регулярное ежегодное образование над ней мощного весеннего циркумполярного вихря. Внутри вихря температура воздуха резко падает: чем сильнее полярный вихрь и чем дольше он длится, тем холоднее становится воздух внутри. И тем продолжительнее период, благоприятный для образования полярных стратосферных облаков. Но то, что для Антарктиды является обыденным, нехарактерно для Арктики: здесь нет столь же устойчивых низких температур, поэтому мощность и время существования вихря, как правило, значительно меньше. А экстремальные условия, подходящие для образования арктической озоновой дыры, как следствие, случаются редко — примерно раз в 10 лет.

Именно такие условия сложились весной 2020 года. Обычно в течение марта вихрь быстро сокращается и полностью исчезает к 1 апреля, но этой зимой он достиг максимума около 19 млн км<sup>2</sup> в середине февраля и оставался на уровне более 15 млн км<sup>2</sup> до середины апреля (см. рис. 4).

Специалисты NASA отмечают, что на протяжении почти всей зимы в полярной области (60–90° с.ш.) повсюду в тропосфере и стратосфере наблюдались холодные аномалии, а обилие полярных стратосферных

<sup>4</sup> В то же время нелишне отметить, что это явление гораздо менее масштабно, чем его антарктический аналог, где отсчет появления дыры начинается лишь тогда, когда величина ОСО опускается ниже 220 е.Д.

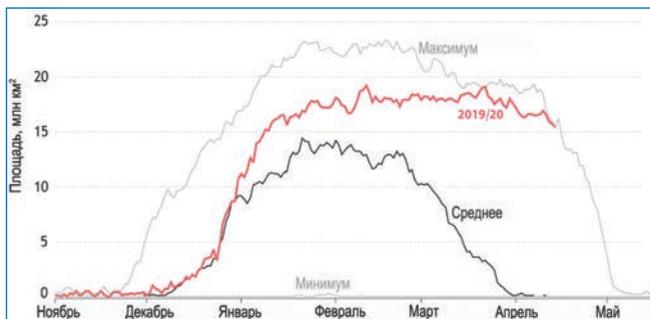


Рис. 4. Площадь арктического циркулярного вихря в период с ноября 2019 года по апрель 2020 года (<https://climate.gov/news-features/event-tracker/spring-2020-brings-rare-ozone-%E2%80%99Chole%E2%80%9D-arctic>)

облаков в течение темных зимних месяцев способствовало созданию намного большего, чем обычно, резервуара озоноразрушающих соединений хлора и брома (см. рис. 5).

Таким образом, весной 2020 года в Арктике наличествовала вся триада слившихся воедино условий, благоприятствующих формированию озоновой дыры: циркулярный вихрь обеспечивал достаточно длительную изоляцию обширной части региона, в которой происходило эффективное уничтожение молекул озона посредством обычных (газофазных) и гетерогенных химических реакций.

Обсуждение арктической озоновой дыры-2020 было бы неполным без ответа на вопрос, чем чревато это явление для северян и арктической биоты. К счастью, в данном случае поводов для беспокойства нет: солнечное ультрафиолетовое излучение опасно поражением открытых участков кожи и хрусталиков глаз, но в марте–апреле почти весь кожный покров скрыт под одеждой, да и светило находится еще достаточно низко над горизонтом. Поэтому куда больший урон могут на-

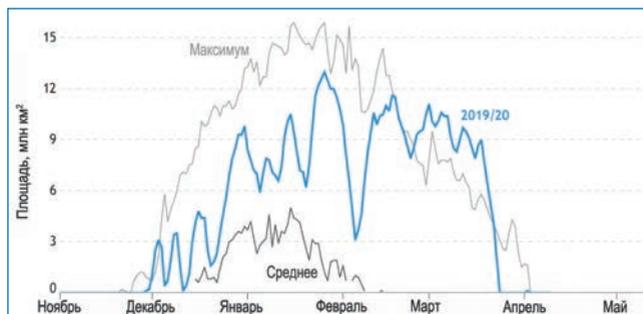


Рис. 5. Площадь распространения полярных стратосферных облаков в Арктике в декабре 2019 года – апреле 2020 года (<https://climate.gov/news-features/event-tracker/spring-2020-brings-rare-ozone-%E2%80%99Chole%E2%80%9D-arctic>)

нести локальные озоновые мини-дыры, возникающие то тут, то там на короткое время в пляжно-летний сезон.

Монреальский протокол 1987 года поставил заслон производству и использованию озоноразрушающих веществ начиная с 1996 года. Однако эффекта от этого запрета приходится ждать довольно долго, в частности, восстановление озонового слоя до «додырного» уровня предполагается к середине XXI века, а по давнему прогнозу специалистов Национального аэрокосмического агентства США, позитивные изменения в озоновом слое проявятся не раньше 2020 года. Интересно, что антарктическая озоновая дыра 2019 года, оказавшаяся наименьшей за последние десятилетия, казалось бы, служит ярким его подтверждением. Но статистика двух последних десятилетий свидетельствует: хотя намечился слабый тренд на сокращение дыры в Антарктике, говорить о том, что теперь год от года озоновая дыра будет все меньше и меньше, явно преждевременно. Вероятно, в ближайшие годы дефицит озона в полярных областях еще не раз напомнит о себе.

*А.А. Киселев (ГТО им. А.И. Воейкова)*