

АНТАРКТИЧЕСКАЯ ОЗООНОВАЯ ДЫРА

Широко распространяет химия руки свои в дела человеческие...
Куда ни посмотрим, куда ни оглянемся –
везде обращаются пред очами нашими успехи ее прилежания...

М.В. Ломоносов

Над Антарктидой последние 35 лет практически ежегодно в весенние антарктические месяцы (сентябрь, октябрь) наблюдается эффект уменьшения общего содержания озона — озоновая дыра. Общее содержание озона (ОСО), т.е. количество молекул в столбе атмосферы единичного сечения, невелико. Если все молекулы озона в атмосфере собрать и осадить в равномерный слой при нормальном атмосферном давлении и температуре, то толщина этого слоя в Антарктиде составит примерно 3 миллиметра. Общее содержание озона принято измерять в так называемых единицах Добсона (е.Д.). 1 мм осажженного слоя озона соответствует 100 е.Д. Антарктической весной в некоторые дни «толщина» этого слоя в разных частях антарктического континента уменьшалась до 100 е.Д. и менее, т.е. более чем в 3 раза. Условно принято считать, что период проявления эффекта озоновой дыры в Антарктиде наступает тогда, когда общее содержание озона не превышает значений 220 е.Д.

Образование и разрушение озона в атмосфере происходит под воздействием солнечного излучения, преимущественно в ультрафиолетовой области его спектра, в ходе фотохимических реакций (под ультрафиолетовой радиацией УФ Солнца понимается радиация в диапазоне длин волн от 0,010 до 0,400 мкм). По воздействию на живые клетки ультрафиолетовую радиацию подразделяют на три части: УФ-А (0,400–0,315 мкм), УФ-В (0,315–0,280 мкм) и УФ-С (короче 0,280 мкм). УФ-С радиация губительна для живого организма даже в небольших дозах вследствие разрушения молекул белка. Но вредное или даже губительное для всего живого жесткое ультрафиолетовое излучение УФ-В и УФ-А практически полностью поглощается молекулами озона, находящимися в стратосфере и не доходит до поверхности Земли. Для красивого загара достаточно воздействия наименее опасного УФ-А излучения.

Е.П. Борисенков показал, что уменьшение общего содержания озона на 5 % при прочих равных условиях

может привести к увеличению ультрафиолетовой радиации в области 300 нм на 5–10 % (Борисенков Е.П. Климат и деятельность человека. М.: Наука, 1982, 136 с.). Именно возможность увеличения неблагоприятных воздействий УФ-радиации на среду обитания человека при уменьшении толщины озонового слоя и вызвала тревогу в обществе и интерес к проблеме истощения озоносферы Земли.

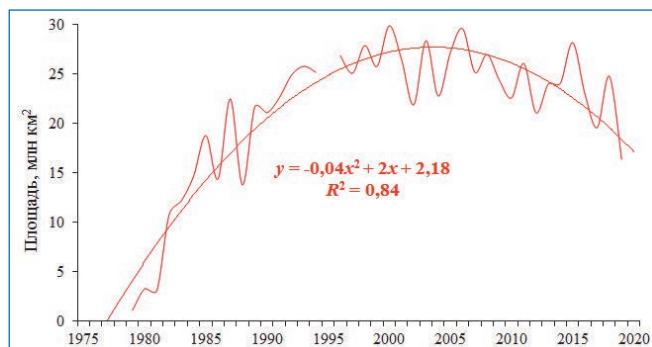
В 1985 году в научном журнале Nature была опубликована статья об устойчивой тенденции уменьшения общего содержания озона в атмосфере над Антарктидой в весенний период (сентябрь–ноябрь) с начала 1980-х годов. Причиной резкого уменьшения содержания озона антарктической весной было названо воздействие на озоновый слой фреонов.

Результаты последующих многолетних натурных исследований этого феномена и дистанционных спутниковых измерений параметров озоносферы над Антарктидой подтвердили, что истощение озонового слоя в весенние месяцы происходит в результате каталитических гетерогенных фотохимических реакций озона с так называемыми хлоридами — ClO — в стратосфере. Они протекают при температурах ниже -78°C в присутствии частиц стратосферных полярных облаков на высотах 15–30 км. Эти условия реализуются внутри так называемого стратосферного циркумполярного вихря. Роль фреонов заключается в том, что эти долгоживущие молекулы (время их жизни в атмосфере превышает десятки лет), содержащие в своем составе хлор, могут проникать и проникли в стратосферу. Там под воздействием УФ-радиации из них и освобождаются атомы хлора. Далее, участвуя в каталитических циклах гетерогенных реакций, атом хлора может разрушить сотни молекул озона, прежде чем он будет нейтрализован в результате реакций с другими газовыми составляющими в стратосфере.

Эти химические соединения — фреоны — созданы человеком, и поэтому их наличие в атмосфере является полностью антропогенным фактором. Гипотеза об уменьшении содержания озона в стратосфере из-за фотохимических реакций с фреонами стала в последующие годы доминирующей и привела, с одной стороны, к существенному расширению исследований озона и других малых газовых составляющих атмосферы, а с другой, к подписанию Монреальского протокола, обязывающего страны-подписанты резко сократить производство озоноразрушающих веществ.

По данным измерений на российских и зарубежных станциях в Антарктиде тенденция уменьшения общего содержания озона антарктической весной наблюдалась уже с середины 1970-х годов. К началу 1990-х годов

Рис. 1. Максимальная площадь озоновых дыр, образовывавшихся над Антарктикой, по данным спутниковых измерений (https://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/statistics/annual_data.html)



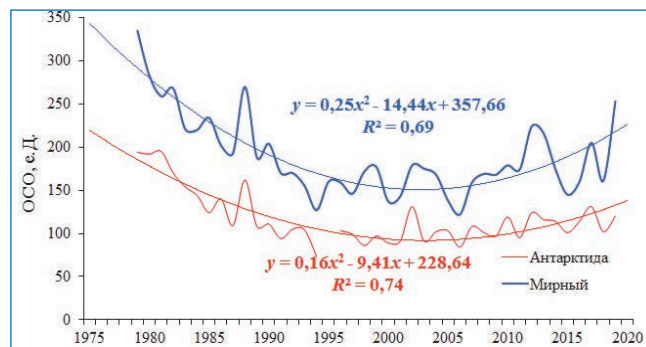
средние величины общего содержания озона в сентябре и октябре на ст. Мирный уменьшились до уровней 70–75 % от их среднего значения за 1975–1980 годы.

Озоновая дыра возникает над материком каждой антарктической весной (в сентябре–ноябре) до сих пор. Она располагается над большими территориями антарктического континента. На рис. 1 показаны максимальные площади озоновых дыр для каждого года за последние 40 лет. Линия тренда хорошо аппроксимируется полиномом второй степени: величина достоверности аппроксимации $R_2 = 0,84$. Хорошо прослеживается тенденция увеличения площади озоновой дыры до начала 2000-х годов, затем — некоторая ее стабилизация и последующий переход к уменьшению. Необходимо отметить существенную межгодовую изменчивость площади озоновых дыр. Она определяется синоптическими условиями, влияющими на формирование, продолжительность и устойчивость стратосферного циркумполярного вихря.

На рис. 2 за эти же годы приведены минимальные значения ОСО над Антарктикой, измеренные со спутников, и на российской станции Мирный по данным наших наземных наблюдений. На этом рисунке достаточно четко прослеживается уменьшение минимальных значений ОСО до начала 2000 годов и начавшийся их рост в последующие годы. При этом минимальные значения ОСО по данным наземных измерений значительно выше измеренных со спутника. Однако характер многолетней изменчивости этих рядов наблюдений одинаков: коэффициент корреляции между ними $r = 0,89$. Более высокие минимальные значения ОСО в Мирном связаны с его географическим положением относительно границ озоновой дыры. В большинстве случаев Мирный оказывался на периферии озоновых дыр. Их границы при изменении синоптических процессов и смене воздушных масс проходят или севернее, или южнее расположения станции, т.е. станция оказывается то в зоне, охватываемой озоновой дырой, то вне ее. А в приграничных частях содержание озона меньше, чем в центральных. Это подчеркивает, в частности, и то обстоятельство, что динамические процессы в нижней стратосфере могут оказывать и оказывают большее влияние на общее содержание озона, чем фотохимические, на периферии озоновой дыры, формирующейся и существующей внутри циркумполярного вихря.

На рис. 3 представлены среднесуточные значения ОСО, измеренные за последние пять антарктических сезонов на российских и зарубежных станциях, а также над акваторией Южного океана южнее 55° ю.ш., измерен-

Рис. 2. Минимальные значения ОСО, наблюдавшиеся в различные годы над Антарктикой по спутниковым данным (https://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/statistics/annual_data.html) и по наземным измерениям на станции Мирный



ные на НЭС «Академик Федоров». На рисунке четко прослеживается ежегодное весеннее уменьшение ОСО до значений, характеризующих образование озоновой дыры (менее 220 е.Д.), на большинстве рассматриваемых станций. При этом обращают на себя внимание более высокие значения общего содержания озона в отдельные дни весной на станции Мирный, над которой, как мы уже упоминали, часто располагается граница озоновой дыры.

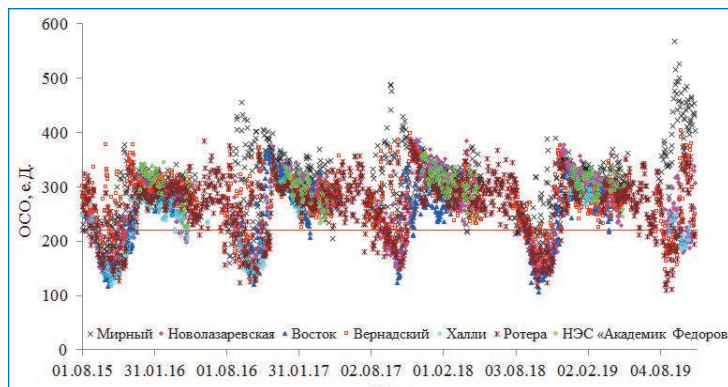


Рис. 3. Среднесуточные значения ОСО на станциях, расположенных в различных районах Антарктиды, и НЭС «Академик Федоров»

Особенностью весеннего антарктического сезона 2019 года является то, что озоновая дыра почти не захватывала восточную часть Антарктиды. В результате на станции Мирный значения ОСО весной не опускались ниже 220 е.Д. В то же время в отдельные дни на этой станции общее содержание озона было самым высоким с 1975 года. На станции Новолазаревская, вблизи которой в этом году располагались границы озоновой дыры, величины ОСО менее 220 е.Д. наблюдались в третьем квартале только в течение 9 дней: 3 дня в середине августа и после 24 сентября. При этом в октябре значения ОСО опускались ниже 220 е.Д. в течение 17 дней.

Специфические особенности развития озоновой дыры в 2019 году можно видеть и на рис. 4. На нем показано, как изменялись площади озоновой дыры в течение сезонов наблюдений за предшествующие 7 лет. В августе 2019 года площадь дыры была даже несколько больше, чем в предыдущие годы, и к началу сентября, по данным наблюдений с разных спутников, она достигла максимального размера 11–16 млн км². Затем произошло внезапное потепление стратосферы. В результате площадь дыры уменьшилась до 3–6 млн км² к дню весеннего равноденствия (в Антарктиде). В конце сентября атмосфера стала более стабильной, и это привело к тому, что площадь озоновой дыры вновь увеличилась к середине октября до 8–10 млн км². Затем площадь дыры начала снова уменьшаться, и уже в начале ноября

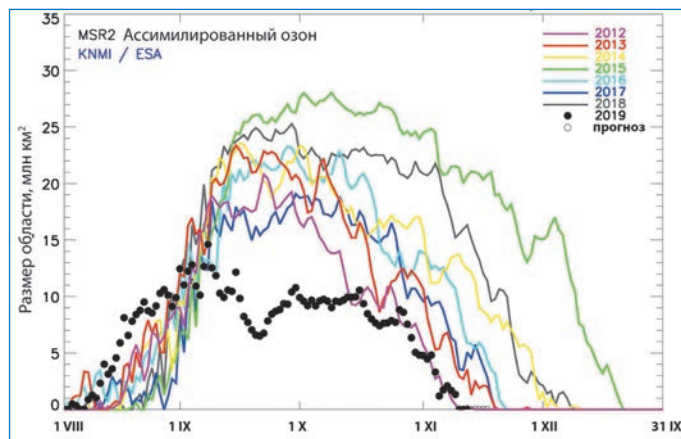


Рис. 4. Площадь озоновой дыры по данным спутниковых измерений (<http://www.temis.nl/protocols/o3hole/>)

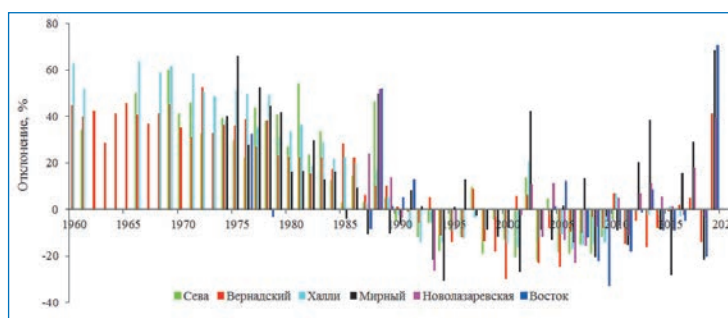
мированные отклонения значений ОСО, осредненных за сентябрь, с начала их наблюдений до 2019 года. Соответствующие нормы ОСО на каждой из станций рассчитывались за период 1981–2010 годов.

Как видно, до середины 1980-х годов значения отклонений практически на всех станциях положительны. Затем отклонения на разных станциях для конкретного года начинают отличаться по знаку, а уже с середины 1990-х преобладают отрицательные значения отклонений. С начала 2000-х годов отмечается тенденция возвращения величин ОСО к значениям, характерным для периода, предшествующего проявлению эффекта озоновой дыры (рис. 2, 5). Наиболее вероятно, что это связано с последствиями

ограничения выбросов озоноразрушающих веществ в атмосферу.

Результаты наблюдений общего содержания озона на антарктических станциях за последние 40 лет наглядно продемонстрировали, насколько широко распростерла рукотворная химия руки свои не только в дела человеческие, но и в природные процессы в самых отдаленных и труднодоступных областях Земли. Оказалось, что «успехи ее прилежания» — по Ломоносову — привели к последствиям совсем неожиданным и даже нежелательным. А для их устранения

Рис. 5. Нормированные отклонения средних за сентябрь значений ОСО на различных станциях в Антарктиде



дыра перестала существовать. Таким образом, озоновая дыра в 2019 году по площади и интенсивности разрушения озонового слоя оказалась самой маленькой за последние годы.

Картина многолетней изменчивости общего содержания озона по данным наблюдений на шести антарктических станциях представлена на рис. 5. На нем приведены нор-

мированные отклонения значений ОСО, осредненных за сентябрь, с начала их наблюдений до 2019 года. Соответствующие нормы ОСО на каждой из станций рассчитывались за период 1981–2010 годов.

Как видно, до середины 1980-х годов значения отклонений практически на всех станциях положительны. Затем отклонения на разных станциях для конкретного года начинают отличаться по знаку, а уже с середины 1990-х преобладают отрицательные значения отклонений. С начала 2000-х годов отмечается тенденция возвращения величин ОСО к значениям, характерным для периода, предшествующего проявлению эффекта озоновой дыры (рис. 2, 5). Наиболее вероятно, что это связано с последствиями

ограничения выбросов озоноразрушающих веществ в атмосферу.

Результаты наблюдений общего содержания озона на антарктических станциях за последние 40 лет наглядно продемонстрировали, насколько широко распростерла рукотворная химия руки свои не только в дела человеческие, но и в природные процессы в самых отдаленных и труднодоступных областях Земли. Оказалось, что «успехи ее прилежания» — по Ломоносову — привели к последствиям совсем неожиданным и даже нежелательным. А для их устранения

потребовались немалые затраты, связанные с прекращением производства озоноразрушающих химических веществ и заменой другими в различных областях их использования.

*Е.Е. Сибир,
В.Ф. Радионов
(ААНИИ)*