

5 МОНИТОРИНГ ОЗОНОВОГО СЛОЯ

Мониторинг озонового слоя представляет собой систему наблюдений за состоянием озонового слоя, а также оценку и прогнозирование его изменений в целях своевременного выявления негативных воздействий природных и антропогенных факторов [18]. Наблюдения за состоянием озонового слоя проводятся на пунктах мониторинга озонового слоя организаций, подчиненных Министерству образования.

Атмосферный озон в силу своих оптических и фотохимических свойств является одним из важнейших атмосферных газов. Поглощение озоном коротковолновой солнечной радиации и излучение в инфракрасной области спектра являются важнейшими составляющими радиационного и термического баланса всей атмосферы и стратосферы в частности. Именно общее содержание озона в вертикальном столбе атмосферы (ОСО) определяет уровень и спектральный состав приземного биологически активного солнечного ультрафиолетового излучения на поверхности Земли, что является жизненно важным для существования человека и разнообразных форм жизни.

Мировые тенденции. Современный уровень исследований показывает, что процессы создания озона определяют вертикальную термическую структуру атмосферы и определяют существование специфической области, называемой стратосферой — слоя воздуха (20-50 км) с температурной инверсией – слоя в котором температура растет с высотой и обладающего вследствие этого динамической стабильностью. Изменение содержания и распределения озона в этой области атмосферы может привести к изменению динамических процессов на этих высотах.

Таким образом, верхняя атмосфера является существенным звеном общей циркуляции атмосферы, изменения термодинамических параметров стратосферы в конечном итоге оказывает воздействие на характер циркуляции тропосферы (погодные условия), непосредственно влияющей на жизнедеятельность человека. На сегодняшний день найдено много свидетельств того, что стратосферный озон как часть атмосферы играет ключевую роль в процессах, определяющих состояние глобальной климатической системы и связи процессов, протекающих в различных атмосферных слоях.

В последнее время установлено, что изменения циркуляционных процессов в стратосфере в ряде случаев можно рассматривать как предиктор изменений тропосферной циркуляции. Вследствие этого, общее содержание озона рассматривается как один из важнейших климатических параметров и Всемирная Метеорологическая Организация (ВМО) уделяет большое внимание мониторингу и изучению состояния озонового слоя как в глобальных, так и в региональных масштабах. Результаты исследований публикуются в отчетах SCIENTIFIC ASSESSMENT OF OZONE DEPLETION VMO, издаваемых каждые четыре года.

Рост концентрации озоноразрушающих веществ (ОРВ) вызвал наблюдаемое с 1980 по середину 1990-х большое повсеместное снижение содержания озона в атмосфере. С конца 1990-х концентрации озоноразрушающих веществ снижаются из-за успешного действия Монреальского протокола. Согласно последней оценке ВМО [1] и сделанным ранее оценкам (2010) с 2000 г. уровень общего содержания озона в глобальном масштабе стабилизировался, прежнего значительного отрицательного тренда ОСО не наблюдается и есть надежда на восстановление озонового слоя.

Наблюдения последних лет показывают, что общее содержание озона остается в рамках прежних значений, ниже уровня 80-х годов прошлого столетия, однако резкий отрицательный тренд отсутствует. Восстановление содержания озона в глобальных масштабах, предсказанное результатами математического моделирования идет гораздо медленнее, что отчасти связано с изменениями глобальных атмосферных параметров – изменением концентрации парниковых газов и остыванием стратосферы, особенно в полярных районах обоих полушарий, где низкие температуры создают условия для разрушения молекул озона. Говорить о восстановлении озонового слоя преждевременно.

На сегодняшний день общее содержание озона в атмосфере (ОСО) на 2 % ниже, чем в 80-х годах прошлого столетия для широтного пояса ($60^{\circ}\text{S} - 60^{\circ}\text{N}$). Для высоких широт ($35^{\circ}\text{N} - 60^{\circ}\text{N}$) Северного полушария ОСО ниже примерно на 3,5%, а для Южного полушария ($35^{\circ}\text{S} - 60^{\circ}\text{S}$) ниже на 6%. Такое межполушарное различие связывают с потерями озона весной в Антарктиде, обусловленными антарктической озоновой дырой. Изменений ОСО в тропиках ($20^{\circ}\text{S} - 20^{\circ}\text{N}$) не наблюдается. Уровень общего содержания озона (большую часть которого обеспечивает стратосферный озон) в глобальных масштабах остается стабильным с 2000 года.

Измерения показывают статистически значимое увеличение содержания озона в верхней стратосфере (высоты 35-45 км) в средних широтах и тропиках примерно с 2000 года. Около половины увеличения содержания озона в верхней стратосфере можно отнести к снижению концентрации ОРВ.

После значительного снижения (5-8% за десятилетие) наблюдаемого в 1980-х и 1990-х годах, содержание озона за десятилетие 2000–2013 гг. увеличилось на 2,5-5%.

В Северном полушарии в среднем наблюдается некоторое увеличение содержания озона на высотах 35-40 км и в нижней стратосфере (12-15 км). Однако рост концентрации озона в стратосфере найден далеко не во всех регионах; на некоторых станциях отмечается наличие небольшого отрицательного тренда стратосферного озона и общего содержания озона.

Анализ динамики озоносферы над территорией Республики Беларусь за 2016 год. В 2016 году в НИИЦ МО БГУ по результатам проведенного мониторинга был продолжен анализ долговременных изменений состояния озоносферы над территорией Республики Беларусь. На рисунке 5.1 представлены результаты мониторинга ОСО, проводившегося в трех пунктах наблюдения на территории Республики.

В дополнение к результатам локального наземного мониторинга ОСО использовались данные систем орбитального базирования (TOMS, OMI). Как видно из рисунка 5.1, несмотря на заметные неоднородности поля озона, можно считать, что в основном территория Республики Беларусь находится под влиянием одной области значений ОСО, поэтому для анализа были использованы среднесуточные значения ОСО, полученные для г. Минска.

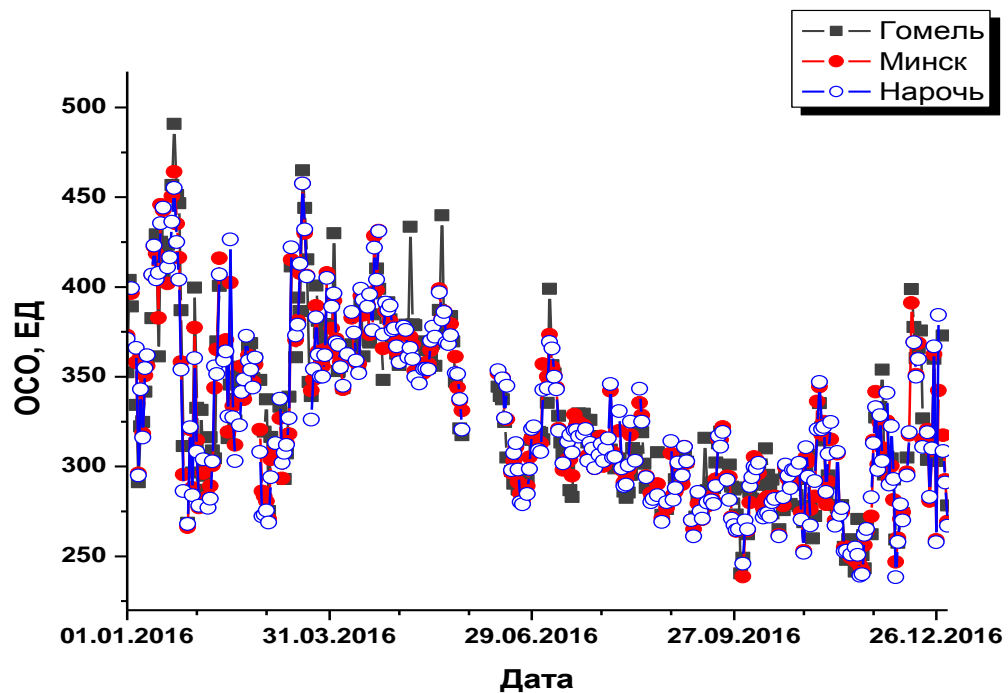


Рисунок 5.1 – Среднедневные значения ОСО за 2016 год

Для пункта наблюдения Минская озонометрическая станция (53.83 с.ш., 27.47 в.д.) были рассмотрены ряды среднесуточных, среднемесячных и среднегодовых значений ОСО а также их линейные тренды для периодов 1979–1992 и 1997–2016 гг.

На рисунке 5.2 представлены результаты наблюдений среднесуточных значений ОСО в период 2011–2016 гг. в сравнении с климатической нормой ОСО, а также их среднемесячные значения. Отмечены также наиболее выраженные озоновые аномалии, за которые в данном анализе принимались наблюдаемые значения ОСО, выпадающие из 95%-го доверительного интервала разброса среднедневных значений, используемых для определения климатической нормы.

Как видно из рисунка 5.2, начиная с 2013 г. растет число положительных аномалий, зарегистрированных над территорией Республики Беларусь. Особенно много их было в 2015 г. Среднемесячные значения ОСО приближаются к климатической норме, которая в настоящее время испытывает медленный рост с добавлением данных каждого последующего года.

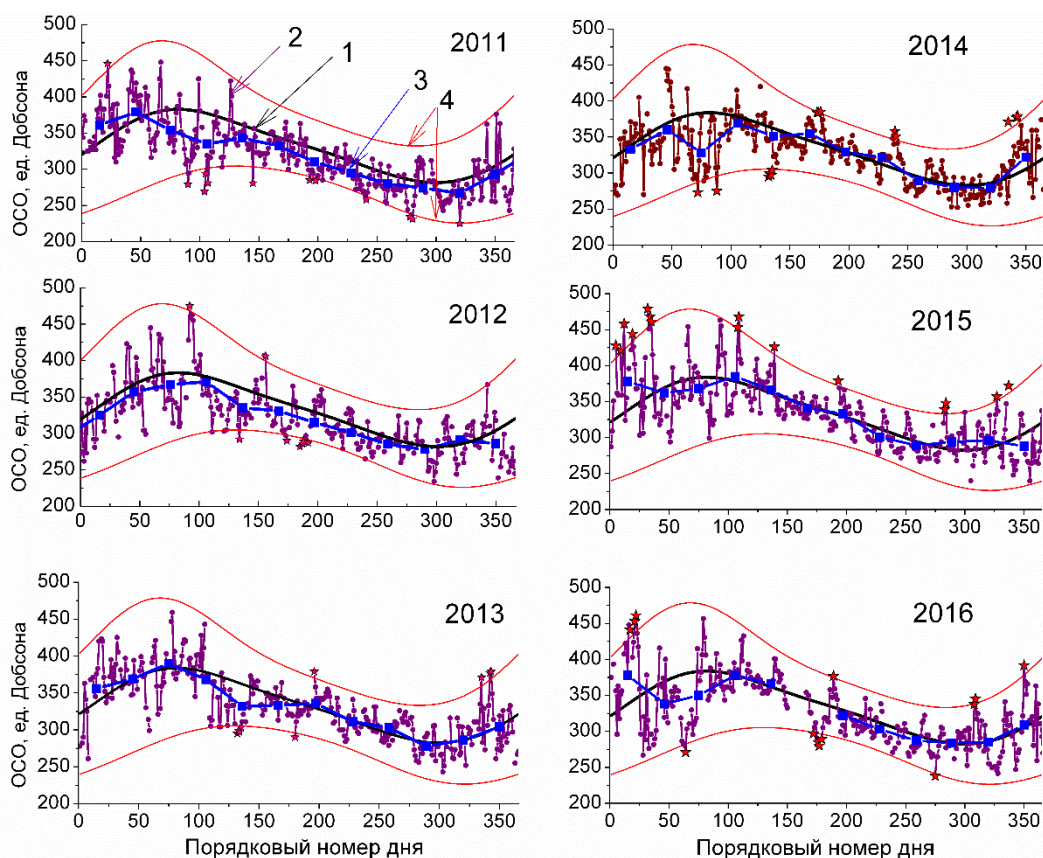


Рисунок 5.2 – Среднедневные значения ОСО в атмосфере над территорией Республики Беларусь в 2011 – 2016 гг.: 1 – годовой ход климатической нормы, 2 – данные наблюдений, 3 – среднемесячные значения, 4 – 95%-й доверительный интервал. Звездочками отмечены наиболее значительные озоновые аномалии

В период 1979 до конца 90-х величина тренда среднегодовых значений ОСО составляла $\sim 1,5$ ЕД/год, начиная с 2000 г. отрицательный тренд сохранился, однако величина его уменьшилась и для периода 2000 – 2016 гг. составляет $\sim 0,3$ ЕД/год (рисунок 5.3). Как видно из рисунка 5.3, среднегодовые значения ОСО испытывают значительную межгодовую изменчивость.

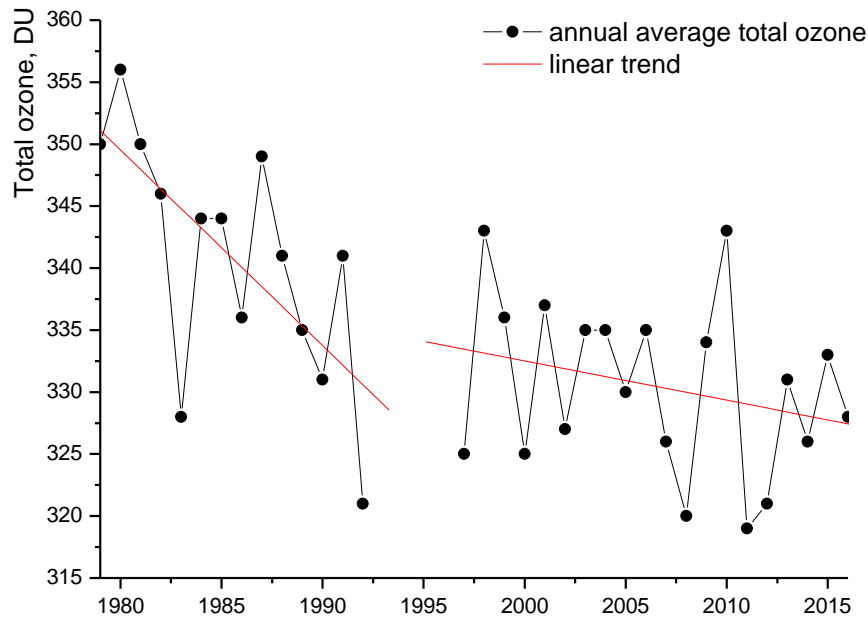


Рисунок 5.3 – Среднегодовые значения общего содержания озона и линейный тренд для периодов 1979 – 1992 гг. и 2000 – 2016 гг.

Анализ долговременных тенденций среднемесячных значений ОСО для рассматриваемых временных периодов показал, что в 80-х и 90-х прошлого столетия отрицательный тренд ОСО в той или иной мере был выражен во все сезоны, но наиболее сильное снижение ОСО наблюдалось зимой и ранней весной. После 2000 г. величина отрицательного тренда для всех месяцев, за исключением июня и сентября, значительно снизилась, в январе и в меньшей степени в феврале отмечается положительный тренд среднемесячных значений ОСО (рисунок 5.4).

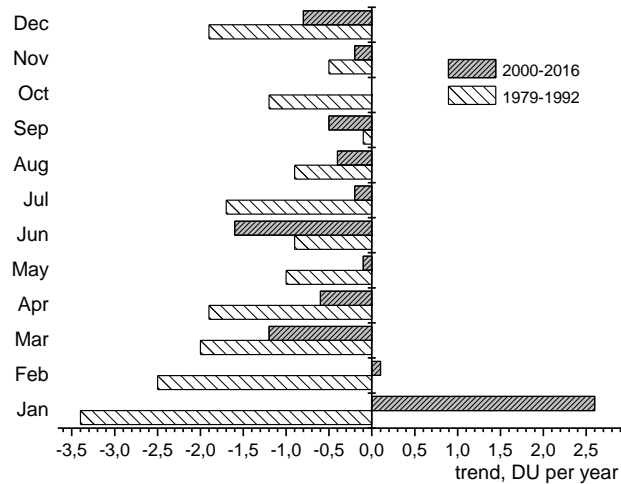


Рисунок 5.4 – Значения трендов среднемесячных величин ОСО для периодов 1979 – 1992 гг. и 2000 – 2016 гг.

Совместный анализ вариаций среднемесячных значений ОСО и вариаций глобальных циркуляционных процессов в тропосфере Северного полушария показал их взаимосвязь. Анализ колебаний циркуляционных процессов проводился с использованием типизации макромасштабных циркуляционных процессов внетропических широт Дзержеевского и соответствующего календаря смены циркуляционных ситуаций в Северном полушарии. Выбранная классификация глобальных циркуляционных процессов

в тропосфере основана на учете циркуляционной связи между высокими и умеренными широтами, выраженной количеством арктических вторжений и районом, где они происходят, позволяет выявить многократно повторяющиеся циркуляционные ситуации в масштабе полушария.

Анализ повторяемости типов зональной и меридиональной циркуляции для января и февраля, для временных периодов 1979–1992 гг. и 2000–2016 гг. показал, что вариации в озоносфере и циркуляционные процессы в тропосфере взаимосвязаны. Найдено, что для рассматриваемых временных периодов для января и февраля количество дней с меридиональной северной циркуляцией испытывает то же направление тренда, что и средние за январь-февраль значения ОСО (рисунок 5.5).

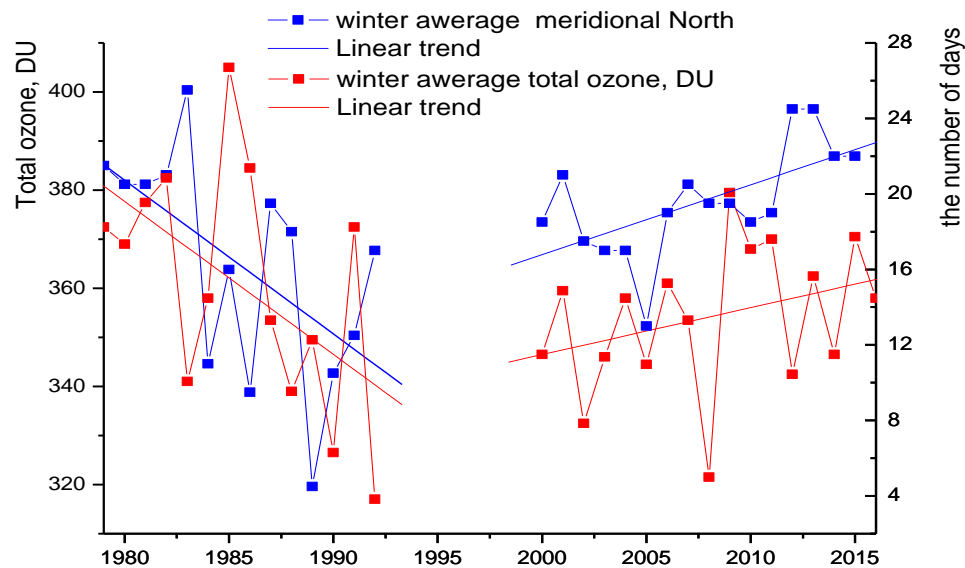


Рисунок 5.5 – Тренды средних для января-февраля значений ОСО и количества дней с меридиональной северной циркуляцией для периодов 1979 – 1992 гг. и 2000 – 2016 гг.

Такое соответствие трендов циркуляционных процессов в Европейском секторе Северного полушария и содержания озона в атмосфере указывает на тесную связь процессов, протекающих в тропосфере, с динамикой озоносферы, так как типизация макромасштабных процессов проведена на основании анализа синоптических процессов в тропосфере и отражает процессы, развивающиеся в разных районах земного шара. Обнаруженная связь может быть полезной для долгосрочного прогноза погоды и ОСО.

В 2016 г. НИИЦ МО БГУ совместно с ГГО им. А.И. Воейкова было продолжено детальное исследование причинно-следственных связей между содержанием озона в стратосфере и динамикой тропосферных воздушных масс («озоновый механизм»). Особое внимание уделялось влиянию распределения стратосферного озона на характеристики тропосферной циркуляции и связанные с ними погодные и климатические условия. Были получены дополнительные подтверждения тесной связи полей ОСО и синоптических образований верхней тропосферы в виде планетарных воздушных масс (ВМ). Установлено, что тропосферные ВМ формируют различия в содержании озона и соответственно определяют температуру стратосферы. Высота тропопаузы представляет собой результат динамического равновесия между двумя противоборствующими категориями процессов – вертикальной конвекцией в тропосфере, т.е. характеристиками тропосферной воздушной массы и радиационным нагревом стратосферы в результате озонового цикла. Таким образом, стратосферные и тропосферные явления могут влиять друг на друга. Воздействие озона на погоду и климат в заданном регионе может осуществляться не через некоторое прямое воздействие на атмосферные потоки, а в

первую очередь, путём изменения положения стационарных фронтов и непосредственно характеристик глобальных циркуляционных ячеек (например, само смещение уровня тропопаузы может иметь воздействие на ячейку циркуляции).

Взаимное влияние и относительная роль тропосферных и стратосферных механизмов зависят от региона и времени года. В зоне средних широт, в которой располагается Беларусь, в летний период существенное влияние оказывают тропосферные процессы, а в процессе перехода в зимний период начинает превалировать и играть существенную роль озоновый механизм. Учет подобного механизма открывает возможности повышения точности долговременного прогноза погодных явлений.

Озоновые аномалии северного полушария как фактор состояния атмосферы. Исследования в области моделирования атмосферных процессов, проведенные за последние десятилетия, свидетельствуют о тесной взаимосвязи стратосферных процессов с динамическими тропосферными процессами, ответственными за формирование погоды и регионального климата. Постепенно приходит понимание того, что анализ одних только тропосферных процессов недостаточен, и земную атмосферу необходимо рассматривать как единое целое, активно включая в рассмотрение погодных и климатических явлений стратосферные и даже мезосферные процессы.

В этой связи важным и до конца невыясненным является вопрос возникновения в атмосфере Северного полушария сезонных озоновых аномалий, а также их связь с изменениями температурного режима стратосферы.

Кроме научной проблемы исследования стратосферно-тропосферных связей и их влияния на погоду и региональный климат, данная проблема имеет важное практическое значение, связанное с созданием системы среднесрочного прогноза уровней и доз биологически активного солнечного УФ излучения на территории Республики Беларусь.

Под озоновыми «мини-дырами» (отрицательными озонными аномалиями) обычно понимают кратковременное (в течение нескольких суток, в крайнем случае – недель) резкое понижение общего содержания озона в атмосфере над значительной по площади территорией земной поверхности.

Общепринятым для определения локальной озоновой аномалии является используемый практически во всех публикациях наиболее общий критерий: локальной озоновой аномалией считается более чем 20%-е отклонение поля ОСО от его «нормальных значений».

В то же время, существуют различные подходы к вопросу о том, что считать «нормальным» распределением ОСО для данной конкретной задачи, поэтому даже в таком определении локальных озоновых аномалий остаётся некоторая неоднозначность.

Как уже отмечалось, несмотря на повышенный интерес к данному явлению, причины образования и механизмы развития озоновых «мини-дыр» до конца не выяснены, хотя их наличие может оказывать существенное влияние на состояние озоносферы над конкретным географическим регионом.

Так, в течение первого квартала 2016 года общее содержание озона (ОСО) в атмосфере над территорией республики испытывало значительные вариации. Среднемесячное значение ОСО в январе на 10% превышало январское многолетнее среднее (378 ЕД и 341 ЕД соответственно). Такое состояние озоносферы в начале года соответствует положительному тренду озона, отмеченному в глобальных масштабах после 2000 г и наблюдаемому над Беларусью только в зимний период года. В остальные месяцы над территорией республики по-прежнему сохраняется небольшой отрицательный тренд ОСО (после 2000 г. величина отрицательного тренда уменьшилась). Именно в зимний период территория республики стала часто оказываться под влиянием положительных озоновых аномалий. В феврале и марте среднемесячные значения ОСО оказались ниже многолетних средних среднемесячных значений на 7,5%-8%. Такая ситуация была связана с образованием большой отрицательной озоновой аномалии над севером Азии, которая видоизменяясь и перемещаясь несколько раз оказывалась над

территорией Республики Беларусь. При этом нередко наблюдалось снижение ежедневных значений ОСО на 22%-26%, а 04.03.2016 отклонение от многолетнего среднего составило -32% (рисунок 5.6). Появление такой большой и долгоживущей аномалии в данном географическом регионе – редкое явление. Вообще образование областей со сниженными значениями ОСО согласно проведенному в НИИЦ МО анализу обусловлено сочетанием определенных циркуляционных процессов в тропосфере и стратосфере и аномально высокой температурой в тропосфере и аномально холодной в стратосфере.

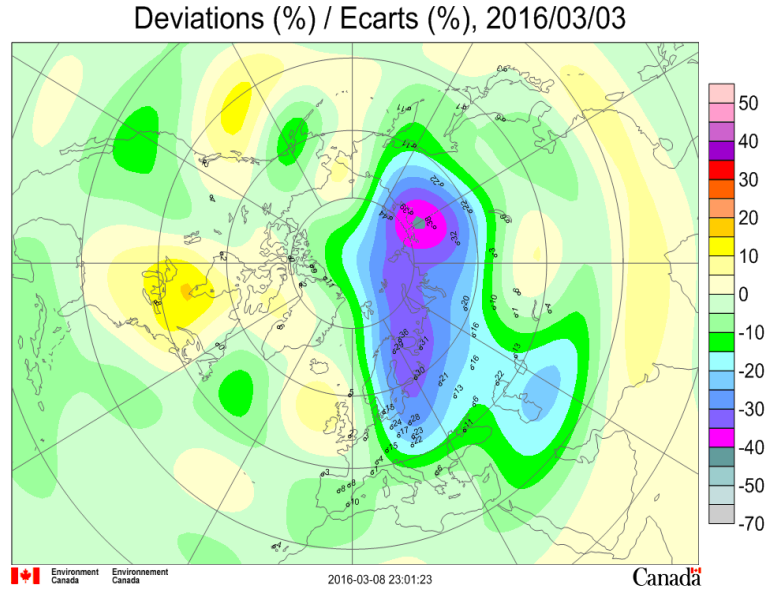


Рисунок 5.6 – Отрицательная озоновая аномалия в первых числах марта 2016 г.: справа приведена цветовая шкала отклонения ОСО от многолетних средних значений в процентах

В апреле и мае значения ОСО были близки к климатической норме, за которую в первом приближении можно принять многолетнее среднее (рисунок 5.7).

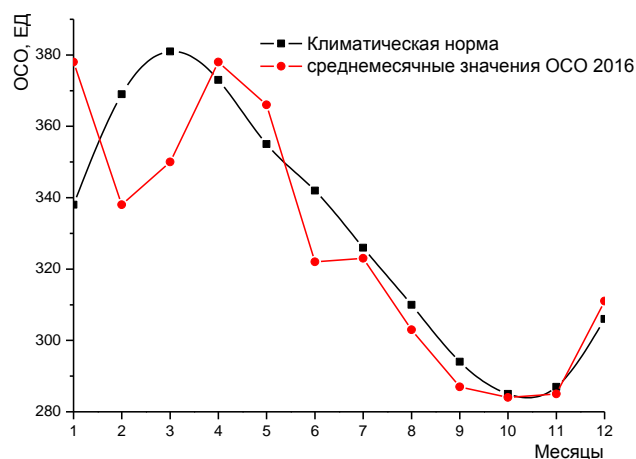
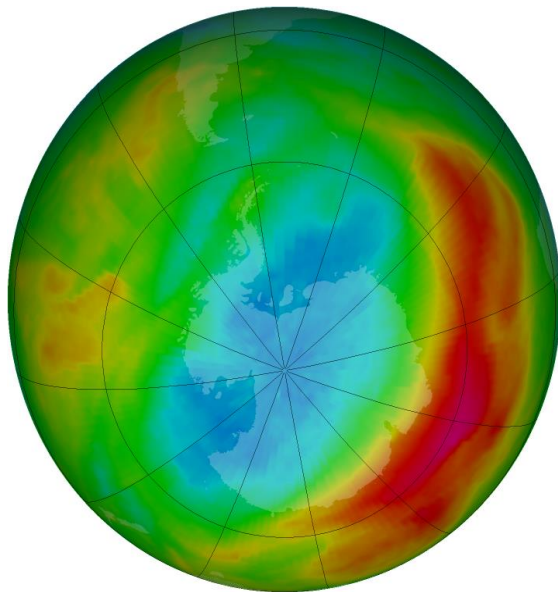


Рисунок 5.7 – Среднемесячные значения ОСО в 2016 г. и многолетние средние среднемесячных значений ОСО (климатическая норма)

Состояние озоносферы в районе Антарктиды

Антарктическая озоновая аномалия («дыра») – область с пониженным содержанием стратосферного озона, которая формируется над Антарктикой в сентябре каждого года, в 2016 г. достигла максимальных размеров (примерно 8,9 млн. кв. миль) 28 сентября (рисунок 5.8). Это несколько ниже средних размеров области с низкими значениями общего содержания озона (ОСО) за весь период наблюдений, начиная с 1991 г. (10 млн. кв. миль). В 2015 г. максимальные размеры области с дефицитом озона составили 10,2 млн. кв. миль.

1979



2016

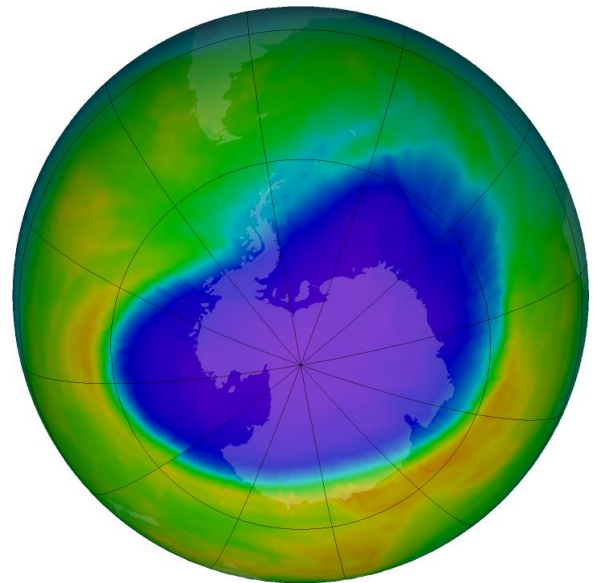


Рисунок 5.8 – Распределение полей озона в сентябре 1979 и 2016 гг.
(NASA's Goddard Space Flight Center)

Минимальное значение общего содержания озона в 2016 г. отмечены 01.10.2016 и составили 114 ЕД. Минимальное значение ОСО в 2015 г. составило 101 ЕД и отмечено 04.10.2015.

Некоторое сокращение размеров области с дефицитом озона и небольшое увеличение минимальных значений ОСО некоторыми учеными рассматривается как признак начала восстановления озонового слоя, обусловленного снижением содержания в стратосфере фторхлоруглеводов, предсказанного ранее с помощью соответствующих математических моделей. Такая динамика озонового слоя в течение нескольких десятилетий подтверждает правильность выводов ученых о причинах появления озоновой дыры и отрицательного тренда озона в глобальных масштабах.