

В.М. Дорохов, Т.Е. Потапова

НАБЛЮДЕНИЯ ОБЩЕГО СОДЕРЖАНИЯ АТМОСФЕРНОГО ОЗОНА В ВЫСОКИХ АРКТИЧЕСКИХ ШИРОТАХ

Анализируются результаты наблюдений общего содержания атмосферного озона на высокоширотной станции о. Хейса (81°с.ш., 58°в.д.) спектрофотометром Брюера.

По данным наземных измерений в 1989–1994 гг., на этих широтах во время полярной ночи не обнаружено каких-либо значимых периодов с заметным снижением содержания озона в атмосфере. Результаты наблюдений в летний период 1992 и 1993 гг. указывают на существенное понижение озона по сравнению с климатическими нормами. Максимальное уменьшение озона (среднее за месяц 16,7%) наблюдалось в августе 1993 г., а снижение общего содержания озона за апрель – сентябрь 1993 г. составило 13,2%.

Введение

С тех пор как была обнаружена озоновая дыра в Антарктиде и рассмотрены различные возможные механизмы ее происхождения, все еще остается неопределенность, в какой степени имеет место подобное явление в северных полярных широтах и насколько оно устойчиво. За последние 20 лет в северном полушарии отчетливо прослеживается снижение общего содержания озона (ОСО) в атмосфере, особенно это заметно в последние годы, причем отмечается более сильный отрицательный тренд ОСО в зимнее время.

Вместе с тем оценка трендов, как правило, ограничивается широтным поясом до 60–65°с.ш., так как число наземных станций в высоких широтах и количество наблюдений на них недостаточно, а получение спутниковых озонных данных ограничено по времени и пространству при больших зенитных углах Солнца в момент наступления сумерок в полярной области. Вследствие этого существуют значительные неопределенности в оценке реального тренда атмосферного озона в арктических широтах, особенно в зимний период.

В последнее время опубликовано несколько сообщений о рекордно низких значениях озона, наблюдаемых наземными станциями и спутниковыми приборами в средних широтах северного полушария. На основе анализа спутниковых данных Глесон и др. [1] сообщили о необычайно низком ОСО в 1992 г. для широтного пояса 65°ю.ш. – 65°с.ш. В [2] приведены результаты анализа данных измерений озона прибором SBUV/2 на спутнике <NOAA-11> для зоны 25–60°с.ш., указывающие на наличие низких значений ОСО начиная с позднего лета 1992 г., которые наблюдались и летом 1993 г. Хотя ситуация с очень низкими величинами ОСО не совсем понятна, похоже, что она связана с присутствием в атмосфере вулканического аэрозоля, появившегося в результате мощного извержения вулкана Пинатубо в июне 1991 г.

Рекордно низкие значения общего содержания озона зарегистрированы и на многих наземных озонометрических станциях северного полушария. Сеть станций США, оснащенных спектрофотометрами Добсона, показала снижение содержания озона относительно нормы в среднем на 12,6% в январе – апреле 1993 г. [3]. Низкие уровни ОСО отмечены в 1992 и 1993 гг. над большими районами Северной Америки, Европы и Сибири [4], где в широтном поясе 45–65°с.ш. дефицит озона в это время достигал 11–13% по сравнению со среднелиматическими нормами. Необычайно низкие значения общего содержания озона получены в Канаде на сети приборов Брюера в широтном интервале 44–75°с.ш., охватывающем долготную зону в 80°. Здесь же наблюдалось снижение значений ОСО от 11 до 17%, причем результаты одновременного анализа озонозондовых данных по вертикальному распределению озона [5] показали, что озонный дефицит отмечался в нижней стратосфере между уровнями 40 и 200 мбар (на таких же высотах наблюдался усиленный аэрозольный слой после извержения вулкана Пинатубо), а максимальные потери озона относятся к уровню 100 мбар, достигая 30% от нормы. Озонозондовые измерения в Гренландии [6] показали 12%-е уменьшение ОСО с конца января 1993 г. Уменьшение концентрации озона наблюдалось в области 14–20 км.

Расчеты изменения ОСО, выполненные в [7] с использованием двумерной модели и включением процессов гетерогенной химии на аэрозольных поверхностях, оцененных по данным SAGE-II, указывают, что максимум озонного снижения в северном полушарии должен проявиться зимой 1992–1993 гг. Если гетерогенный механизм являлся первопричиной, ответственной за низкие уровни озона в 1992–1993 гг., то восстановление озонных концентраций ожидается в 1994 г.

В настоящей статье приводятся результаты наземных спектрофотометрических наблюдений общего содержания атмосферного озона в высоких широтах европейского сектора Арктики на острове Хейса (81°с.ш., 58°в.д.), дополняющие общую картину поля атмосферного озона северного полушария в период до и после извержения вулкана Пинатубо, очевидно, самого мощного извержения этого столетия. При этом рассматриваются изменения ОСО во время полярной ночи для зимних периодов 1989–1994 гг. и анализируются данные наблюдений общего содержания озона в летние сезоны 1990–1993 гг.

Тип измерительных приборов и качество данных озонных наблюдений

С целью получения информации о состоянии арктической атмосферы в январе 1989 года на о. Хейса были начаты высокоточные измерения общего содержания озона. Для измерений использовался спектрофотометр Брюера [8], способный работать при измерениях озона как по Солнцу, так и в условиях полярной ночи по свету Луны. Зимой 1988–1989 гг. проводились экспедиционные исследования, а в мае 1990 г. в рамках совместной исследовательской программы российскими и канадскими специалистами из службы охраны окружающей среды Канады был установлен прибор Брюера новой модификации МК-IV для регулярных озонметрических наблюдений.

Спектрофотометр Брюера МК-IV производства компании SCI-TEC (Канада) представляет собой модификацию прибора Брюера модели МК-II и позволяет в автоматизированном режиме проводить измерения общего содержания атмосферного озона, SO₂, NO₂ и выполнять наблюдения уровней солнечной ультрафиолетовой радиации по заданной программе.

Для получения значений общего содержания озона использована стандартная методика вычисления ОСО по данным измерения радиации на четырех длинах волн в диапазоне 310–320 нм, принятая для спектрофотометров Брюера. Результаты наблюдений ОСО в зимний период получены по данным спектрофотометрических измерений излучения от Луны. Данные летних наблюдений озона, анализируемые в настоящей статье, являются результатами измерений ОСО по прямому солнечному излучению.

Для проверки качества озонных измерений спектрофотометра Брюера было проведено несколько циклов сравнений прибора с другими озонόμεтрами при наблюдениях ОСО по прямому солнечному излучению, включая привязку к эталонной триаде озонόμεтров Брюера в Торонто, сличение со спектрофотометром Добсона N 107, прокалиброванным в 1988 г. по эталонному спектрофотометру Добсона США. Расхождение среднесуточных значений озона при этом не превышало 1% для интервала изменений озонной оптической массы атмосферы от 1,6 до 3,2. Контроль долговременной стабильности используемого на о. Хейса спектрофотометра Брюера осуществляется по показаниям встроенной в озонόμεтр стандартной галогенной лампы. Анализ четырехлетнего массива отчетов стандартной лампы с мая 1990 по март 1994 г. показал соответствие их значений первоначально установленным в пределах $\pm 0,5\%$, что свидетельствует о нормальной работе прибора в течение длительного промежутка времени.

С целью оценки качества данных наблюдений общего содержания озона на о. Хейса были выполнены дополнительные исследования зависимости показаний прибора Брюера от величины зенитного угла Солнца, рассмотрены случайные составляющие погрешности при измерениях ОСО по Луне и Солнцу. Наблюдения ОСО по прямому солнечному излучению проводятся, как правило, для условий, когда оптическая масса атмосферы m не превышает 3,2. При ее значительном увеличении появляется систематическая ошибка измерений, приводящая к ложному снижению данных по озону. Ошибка связана как с уменьшенным уровнем регистрируемого прямого излучения Солнца и возрастающим вкладом в погрешность рассеянного внутри одинарного монохроматора света от более длинных волн, так и с увеличением доли рассеянного света в атмосфере.

Результаты наших исследований показали, что предел допустимого значения оптической воздушной массы атмосферы, когда еще не наблюдается кажущегося снижения показаний спектрофотометра Брюера при измерении озона, наступает при $m = 4,2$ и снижается до $m = 3,8$ при наблюдениях в дымке и сквозь тонкие облака в атмосфере. При увеличении m появляется систематическая погрешность измерения, возрастающая до минус 3% при $m = 5,5$. Случайная составляющая ошибки единичного наблюдения ОСО по прямому Солнцу при хороших атмосферных условиях ниже 1% при $1,3 < m < 3,5$ и возрастает до 2% при $m = 5$. Для лунных наблюдений при $1,6 < m < 3,2$ ее величина изменяется от 2 до 3% и достаточно быстро увеличивается до 5% при $m = 3,6$.

С учетом приведенных соотношений для получения качественных данных при наблюдениях общего содержания озона верхний предел воздушной массы при измерениях по Луне был установлен при $m = 3,2$, а для прямых солнечных измерений выбран $m = 3,8$. В этой связи период наблюдений ОСО по Солнцу ограничен в летний период с начала апреля по середину сентября. Измерения общего содержания озона во время полярной ночи выполнялись с конца октября по конец февраля с учетом того, что восход Солнца после полярной ночи на широте о. Хейса наступает 23 февраля и наблюдения озона по Луне в марте затруднены из-за подсветки неба солнечным светом.

Так как в период полярного дня Солнце постоянно находится выше горизонта, удается провести большое количество прямых солнечных измерений ОСО и результаты этих наблюдений в мае – августе наиболее точно представляют картину межгодовых летних изменений озона в этом высокоширотном районе европейского сектора Арктики.

Результаты наблюдений и обсуждение

Результаты наблюдений общего содержания озона на о. Хейса (81°с.ш. , 58°в.д.) представлены на рис. 1.

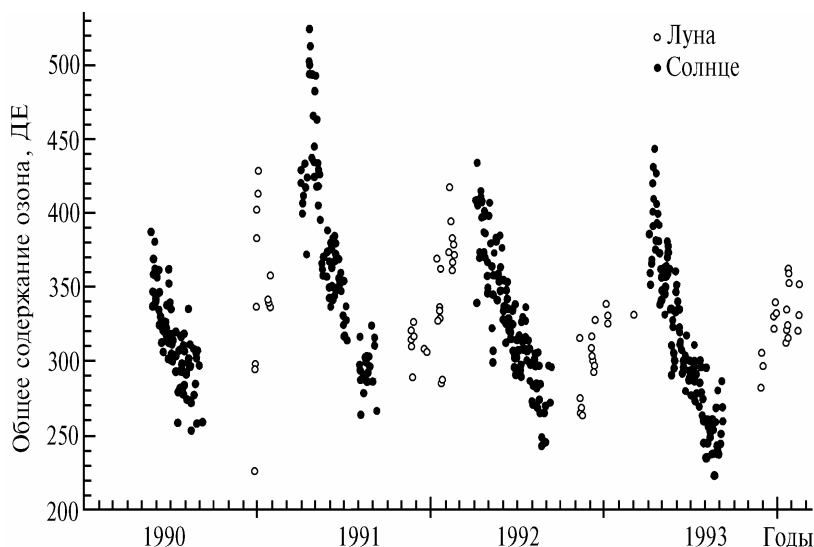


Рис. 1. Результаты измерений общего содержания озона на о.Хейса в 1990 – 1994 гг.

Значения ОСО, рассматриваемые ниже, скорректированы для всего периода наблюдений в соответствии с показателями поглощения озона Басса и Паура [9]. Годовой цикл изменения озона на 81°с.ш. типичен для высоких широт северного полушария. Большие значения ОСО, более 400 ДЕ (единиц Добсона), наблюдаются в конце зимы – начале весны в зависимости от времени наступления периода стратосферного потепления. Минимальные величины ОСО отмечаются здесь, как правило, в зимний период в октябре – ноябре, а в период полярного дня – в конце летнего сезона. В 1992–1993 гг. общее содержание озона достигло рекордно низких уровней в июле – августе, причем среднемесячное значение ОСО в августе 1993 г. составило 249 ДЕ, что является самым низким среднемесячным содержанием озона за весь пятилетний цикл наблюдений в этом регионе Арктики. Максимальные величины ОСО зарегистрированы в

весенний период 1991 г., когда его общее содержание в атмосфере увеличилось до 528 ДЕ 24 апреля. Самый низкий озон был измерен 27 декабря 1990 г. на уровне 226 ДЕ.

Общее содержание озона в период полярной ночи

Общее содержание озона над о. Хейса в период полярной ночи в 1989–1994 гг. было достаточно устойчиво. Для этого времени весьма характерны периоды с относительно спокойным состоянием озоносферы, когда в течение нескольких месяцев, особенно в ноябре – январе, озон, за исключением недельного периода в конце декабря 1990 г. – начале января 1991 г., изменялся несущественно и его ежемесячные вариации не превышали 10%. Так, в январе и первой половине февраля 1989 г. значения ОСО менялись мало и находились в пределах 310–350 ДЕ. В январе 1991 г. на о. Хейса также не было отмечено каких-либо существенных изменений ОСО. Величина ОСО незначительно менялась от 340 до 360 ДЕ. Температура в нижней стратосфере на уровне 50 мбар во второй половине января 1991 г. была достаточно стабильной, но не опускалась ниже -80°C . В январской серии наблюдений озона 1989 г. она часто достигала -85°C , значения ОСО были заметно ниже и изменения ОСО над о. Хейса в значительной мере совпадали с изменениями температуры в нижней стратосфере [10, 11]. Как правило, при ее понижении отмечалось снижение регистрируемых спектрофотометром величин общего содержания озона в атмосфере. Такие периоды в общем характеризуются невозмущенной динамикой стратосферы. По результатам спектрофотометрических измерений в зимний период 1992–1994 гг. нами также не отмечено резких изменений ОСО по сравнению с предшествующими зимними сезонами.

До 1989 г. в зимнее время наблюдения ОСО на о. Хейса не проводились, и поэтому нет данных, с которыми можно было бы однозначно сравнить полученные в 1989–1994 гг. результаты. В [12] была предложена эмпирическая модель поля ОСО для северного полушария, построенная по данным наземной озонометрической сети за 1974–1984 гг., позволяющая при экстраполяции оценить значения ОСО и их стандартные отклонения для суточных данных и в таких высоких широтах. Рис. 2 иллюстрирует, что все серии наблюдений ОСО в зимний период вполне хорошо согласуются с моделью и никакого резкого снижения ОСО на о. Хейса в ноябре – феврале не происходит.

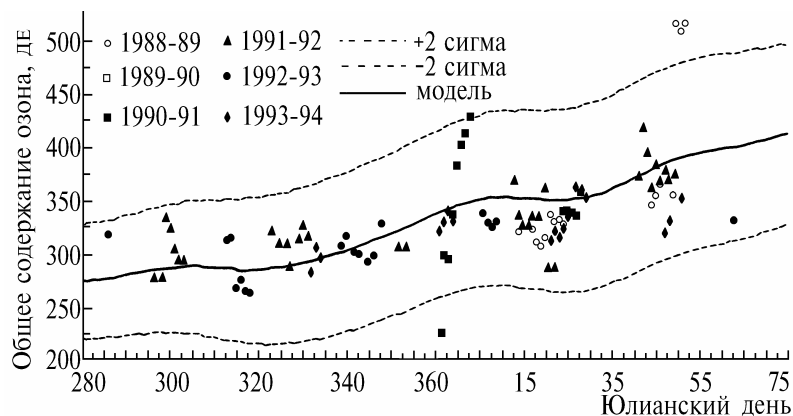


Рис. 2. Результаты наблюдений общего содержания озона в зимние периоды 1989–1994 гг. и данные эмпирической модели ОСО для о. Хейса

Таким образом, в период полярной ночи в 1989–1994 гг. в условиях, когда отсутствует солнечная инсоляция нижней стратосферы, нами не обнаружены какие-либо значимые периоды с заметным снижением общего содержания озона.

Общее содержание озона в период полярного дня

На рис. 3 показан график изменений среднемесячных значений общего содержания озона на о. Хейса для летнего периода апрель – сентябрь 1990–1993 гг. Для сравнения здесь же приведены данные средних за месяц величин ОСО согласно эмпирической модели. На графике отчетливо видно, что в 1992 и 1993 гг. значения ОСО в целом находятся ниже данных наблю-

дений озона 1990–1991 гг. Снижение общего содержания озона в атмосфере над о. Хейса за период апрель – сентябрь 1992 г. составило 8,3% по сравнению с многолетним средним. Факт летней убыли озона – данные 1993 г., в котором озон снизился еще на 5,3% по сравнению с 1992 г. Максимальный уровень снижения общего содержания озона над о. Хейса зарегистрирован нами в августе 1993 г. Уменьшение озона в этот месяц составило 16,7%.

Полученные результаты наблюдений ОСО на о. Хейса во время полярного дня 1992 и 1993 гг. совпадают в целом с общей картиной пониженных значений ОСО летнего периода 1992–1993 гг. в средних широтах северного полушария и показывают, что рекордно низкие значения ОСО в атмосфере характерны и для высоких полярных широт восточного сектора Арктики на 81°с.ш. Снижение уровня ОСО в апреле – сентябре 1993 года составило 13,2%. Причины такого значительного снижения ОСО в 1992–1993 гг. в настоящее время не ясны, хотя многие авторы связывают их с последствиями мощного извержения вулкана Пинатубо. Дальнейшие наблюдения озона позволят уточнить возможные механизмы снижения ОСО в этот период.

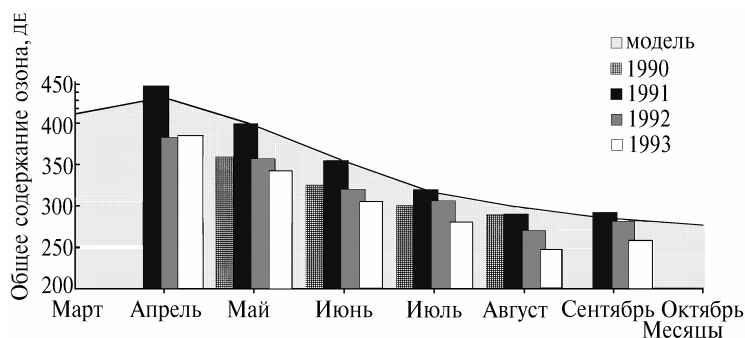


Рис. 3. Данные среднемесячных значений ОСО на о. Хейса в сравнении с моделью для летних периодов 1990–1993 гг.

1. Gleason J. F. et al. // Science. 1993. N 260. P. 523–526.
2. Planet W. G. et al. // GRL. 1994. V. 21. P. 205–208.
3. Komhyr W. D. et al. // GRL. 1994. V. 21. P. 201–204.
4. Bojkov R. D. et al. // GRL. 1993. V. 20. P. 1351–1354.
5. Kerr J. B., D. I. Wardle and D. W. Tarasick // GRL. 1993. V. 20. P. 1979–1982.
6. Jorgenson T. S. et al. // Annales Geophysical. 1994. V. 12. Suppl. 3. P. 597.
7. Rodriguez J. M. et al. // GRL. 1994. V. 21. P. 209–212.
8. Kerr J. B. et al. // In Atmospheric ozone (C.S. Zerefos and A. Ghazi Eds). D. Reidel Publ. Co., 1985. P. 346 – 401.
9. Bass A. M. and R. J. Paug // In Atmospheric Ocean (C.S. Zerefos and A. Ghazi Eds). D. Reidel Publ. Co., 1985. P. 606–610.
10. Дорохов В. М. // Оптика атмосферы. 1990. Т. 3. N 1. С. 132–136.
11. Дорохов В. М., Фиолетов В. Э., Ситникова В. И. // Метеорология и гидрология. 1992. N 6. С. 54–59.
12. Кадыгрова Т. В., Фиолетов В. Э. // Атмосферный озон. М.: Гидрометеиздат, 1990. С. 89–96.

Центральная аэрологическая обсерватория
Росгидромета, г. Долгопрудный

Поступила в редакцию
30 июня 1994 г.

V.M. Dorokhov, T.E. Potapova. **Observation of Total Content of Atmospheric Ozone in High Arctic Latitudes.**

The results of observations of atmospheric ozone total content at high-latitude station on Heiss Island (Lat 81°N, Long 58°E), using Brewer spectrophotometer, are analyzed. No meaningful periodicity with significant decrease of atmospheric ozone content was found from the ground measurement data derived during polar nights of 1989–1994 in those latitudes. The summer observations in 1992–1993 have shown significant decrease of ozone comparative to climatic standards. Maximum decrease of ozone (16,7%, monthly averaged) was observed in August of 1993; the lowering of ozone total content in the period from April to September of 1993 was 13,2%.