

МОНИТОРИНГ ОБЩЕГО СОДЕРЖАНИЯ ОЗОНА И УФ ОБЛУЧЕННОСТИ: ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

А.М. Звягинцев^{1)*}, *Н.С. Иванова*¹⁾, *И.Н. Кузнецова*²⁾,
М.И. Нахаев^{2)*}, *М.П. Никифорова*³⁾

¹⁾ Центральная аэрологическая обсерватория,
Россия, 141700, г. Долгопрудный, М. обл., ул. Первомайская, д. 3; **zvyagintsev45@yandex.ru*,
oom@cao-rhms.ru

²⁾ Гидрометеорологический научно-исследовательский центр РФ,
Россия, 123242, Москва, Большой Предтеченский переулок, д. 11-13; **muza@mecom.ru*

³⁾ Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского (филиал),
Россия, 299038, г. Севастополь, ул. Астана Кесаева, д. 14ж; *nikiforovamp@yandex.ru*

Резюме. Представлен краткий обзор состояния озонового слоя и связанной с ним ультрафиолетовой (УФ) облученности на территории России. Приведены сведения о системе мониторинга общего содержания озона (ОСО) в России. Рассмотрены долговременные изменения ОСО и случаи наиболее значительных аномалий озонового слоя над территорией России. В период 1979-1996 гг. ОСО везде уменьшалось, с 1997 г. имеет место стабилизация ОСО. Долговременные изменения ОСО над различными регионами России близки к изменениям, наблюдаемым над соответствующими зональными поясами. Неожиданные крупные отрицательные аномалии ОСО в последние годы (2011 и 2016) показывают, что, несмотря на прогнозируемое возвращение ОСО к величинам, характерным для 1970-х гг., в будущем сохраняется вероятность появления более значительных отрицательных аномалий продолжительностью до нескольких месяцев.

Ключевые слова. Общее содержание озона, ультрафиолетовая радиация, мониторинг, изменения озонового слоя, аномалия, прогнозирование.

MONITORING OF TOTAL OZONE AND UV IRRADIANCE: THE MAIN RESULTS

A.M. Zvyagintsev^{1)*}, *N.S. Ivanova*¹⁾, *I.N. Kuznetsova*^{2)*},
M.I. Nakhaev^{2)*}, *M.P. Nikiforova*³⁾

¹⁾ Central aerological observatory,
3, Pervomayskaya str., 141700, Dolgoprudny, Moscow Region, Russia; **zvyagintsev45@yandex.ru*,
oom@cao-rhms.ru

²⁾ Hydrometeorological Center of Russia,
9–13, Bolshoi Predtechenskii per., 123242, Moscow, Russia; **muza@mecom.ru*

³⁾ Crimean Federal University Vernadsky,
14, Astana Kesaeva str., 299038, Sevastopol, Russia; *nikiforovamp@yandex.ru*

Summary. A brief review of the state of the ozone layer and related ultraviolet irradiance over the Russian territory is presented. The information on the Russian

system of monitoring of total ozone (TO) are given. Long-term changes of TO and some occasions of great ozone anomalies over the Russian territory are reviewed. Such changes over the different Russian regions are close to changes observed over appropriate zonal belts. TO reduced everywhere during 1979-1996 and stabilized from 1997. Unexpectedly great negative TO anomalies in the last year (2011 and 2016) show that despite of expected TO recovery to values which were usual in 1970th greater negative ozone anomalies with duration up a few months are likely to appear in future.

Keywords. Total ozone, ultraviolet radiation, monitoring, ozone change, anomaly, forecasting.

Введение

Мониторинг озонового слоя и ультрафиолетовой (УФ) облученности является частью мониторинга окружающей среды и осуществляется в целях своевременного выявления вредного воздействия природных и антропогенных факторов на состояние озонового слоя, определения эффективности мероприятий, направленных на его охрану, а также обеспечения государственных органов, иных юридических лиц и граждан экологической информацией. Вредное воздействие на озоновый слой могут производить изменения климата, вулканические извержения, эмиссии так называемых "озоноразрушающих" соединений (в первую очередь, хлорфторуглеродов) и др. Мониторинг озонового слоя в России является основным мероприятием, направленным на выполнение "Венской конвенции об охране озонового слоя" 1985 г.

Озоновый слой – это та часть атмосферы Земли, где экспериментальными методами удаётся обнаружить озон примерно до высоты 80 км. В более узком смысле озоновым слоем или озоносферой называют всю стратосферу или, часто, нижнюю стратосферу – слой от 15 до 30 км, в которой находится основное количество озона в атмосфере – до 75%. Если бы во всей атмосфере соблюдались нормальные условия и её можно было бы разделить на слои, каждый из которых содержал бы только один газ, то толщина всей атмосферы составила бы около 8 км, а слой озона был бы толщиной около 3 мм. Толщина этого гипотетического слоя озона над конкретным пунктом определяет важнейшую характеристику озонового слоя – общее содержание озона (ОСО), измеряемое в единицах Добсона (ед. Д., названных в честь британского метеоролога лорда Г.М.Б. Добсона); приведённая толщина слоя озона в 3 мм соответствует 300 ед. Д. (Перов, Хргиан, 1980).

Озоновый слой изучают по следующим основным причинам: 1) для контроля долговременных изменений озонового слоя, поскольку озон является основным фактором, влияющим на УФ-Б облученность (в спектральном диапазоне 280-315 нм), интенсивность которой определяет жизненные процессы на Земле (Александров и др., 1992), 2) для понимания закономерностей, определяющих состав атмосферы, и, в частности, для проверки правильности химическо-транспортных моделей. Мировое сообщество было чрезвычайно обеспокоено глобальным уменьшением озонового слоя, которое было заме-

чено в середине 1980-х гг. и при сохранении такой тенденции могло бы привести к значительному росту поражений органов зрения и раковых заболеваний.

Целью настоящей статьи является краткий обзор состояния озонового слоя и связанной с ним ультрафиолетовой облученности, прежде всего, на территории России.

Результаты и их обсуждение

Понимание того, что основная часть атмосферного озона сосредоточена высоко над поверхностью Земли, появилось в начале 20 столетия. В 1922 г. классик озонометрии Г.М.Б. Добсон разработал спектрофотометр (с/ф) для измерения ОСО, который до сих пор используется для проведения наиболее точных измерений. Помимо Оксфордского университета в Великобритании, наблюдения с помощью с/ф Добсона были проведены в 1920-30 гг. в нескольких странах Европы, США (Калифорния), Индии, Новой Зеландии. Первыми наблюдениями ОСО, превратившимися в регулярные и длительные, явились наблюдения на станции Ароза в швейцарских Альпах, начавшиеся в 1926 г. Эти наблюдения продолжаются и поныне и широко используются для определения долговременных тенденций изменения озонового слоя. Началом работы мировой сети наблюдений ОСО следует считать Международный геофизический год (1957/1958), когда в ряде стран мира, включая СССР, начались регулярные измерения. Основоположником озонометрических наблюдений в СССР стал Г.П. Гуцин в Главной геофизической обсерватории (ГГО), который организовал мониторинг ОСО в С.-Петербурге и разработал дешевый фильтровый озонометр М-83 (впоследствии доработанный до модели М-124) для сетевых измерений на территории СССР (Гуцин и др., 1987). Озонометрическая сеть СССР насчитывала до 50 работающих станций, в т.ч., на островах в Арктике и нескольких станций в Антарктиде. В конце 1980-х гг. после появления персональных компьютеров и электронной почты в Центральной аэрологической обсерватории (ЦАО) была разработана система оперативного получения данных от станций и построения полей ОСО, которая в настоящее время используется для картирования ОСО над различными регионами мира (WMO, 1993). Наземные озонометрические станции расположены по территории Земли крайне неравномерно: наиболее густо в Западной и Центральной Европе, заметно реже – в Северной Америке, по нескольку станций в Индии, Китае и Японии, и совсем мало – в остальной части Северного полушария и Южном полушарии (рис. 1). Наибольшей точностью измерений обладают с/ф Добсона и Брюера – 1-2%, точность озонометров М-124 – 5-8% (Израэль и др., 2014).

В настоящее время (2017 г.) озонометрическая сеть России включает 27 регулярно работающих станций в Северном полушарии, оснащенных фильтровыми озонометрами М-124. Методическое и техническое руководство сетью осуществляет ГГО; там разрабатываются методики наблюдений, осуществляется проверка озонометров, проводится контроль качества измерений и их коррекция. Данные ОСО от российских станций, 5 станций Казахстана и

1 Туркменистана по электронной почте оперативно поступают в ЦАО, ГГО и Гидрометцентр России. ЦАО оперативно обрабатывает поступившие данные, строит карты распределения ОСО над Россией и прилегающими территориями, проводит первичный контроль качества измерений, при наличии значительных аномалий оповещает Росгидромет и пересылает данные в WOUDC – Мировой центр данных ВМО (Всемирная метеорологическая организация – WMO) по озону и УФ радиации в Торонто, Канада. WOUDC получает данные по ОСО из различных стран и оперативно с привлечением спутниковой информации строит карты распределения ОСО и его аномалий над территорией всего земного шара (<http://exp-studies.tor.ec.gc.ca/>). На этих картах рядом с расположением станции приводится измеренное на ней значение ОСО. Кроме того, на сайте WOUDC приводятся прогнозы распределения ОСО с заблаговременностью до 5 суток по данным NCEP (Национальный центр по прогнозам окружающей среды), США, и KNMI (Королевский Нидерландский метеорологический институт), Нидерланды.

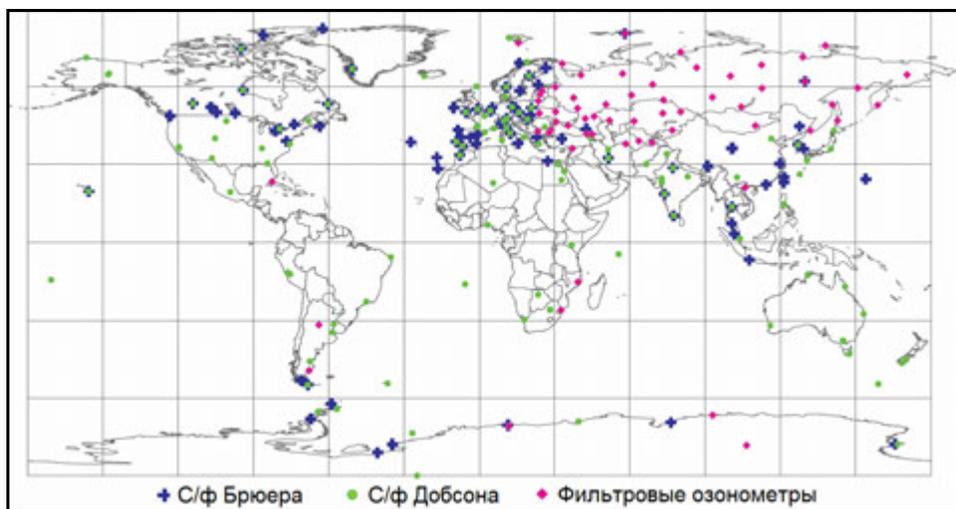


Рисунок 1. Расположение станций мировой наземной озонметрической сети (по состоянию на 2007 г.) (Fioletov, 2008)

Для информирования общественности сотрудники ЦАО ежеквартально публикуют в журнале «Метеорология и гидрология» обзоры с анализом состояния озонового слоя над Россией. Обобщенные сведения также публикуются в ежегодных «Докладах об особенностях климата на территории Российской Федерации» и «Обзорах состояния и загрязнения окружающей среды в Российской Федерации», формируемых Институтом глобального климата и экологии (ИГКЭ) Росгидромета и РАН. Под эгидой WMO-UNEP раз в 4 года публикуются обширные международные доклады, посвященные последним наблюдениям и достижениям в области исследований озонового слоя (WMO, 2015). Раз в 3 года происходят встречи национальных руководителей по исследованиям озонового слоя, к этим встречам государства готовят национальные доклады (WMO, 2014).

Благодаря освоению космоса стали возможными систематические исследования озонового слоя в глобальном масштабе. Уже в первых полетах космонавтов был проведен ряд наблюдений, связанных с изучением озонового слоя; но неизмеримо больше информации предоставили автоматические средства наблюдений с искусственных спутников Земли. Наблюдения из космоса позволяют достаточно точно по спектру отраженной и рассеянной солнечной радиации измерять ОСО на освещенной территории, а по проходящей – вертикальное распределение озона. Спутниковые измерения ОСО начаты США в 1970 г.; с конца 1970-х гг. (именно тогда, когда стали проявляться наиболее значительные изменения озонового слоя) их качество существенно улучшилось. Спутниковые измерения ОСО проводятся с помощью многих средств; наиболее точны данные спутниковых спектрометров TOMS (Total Ozone Mapping System) и функционирующего в настоящее время OMI (Ozone Monitoring Instrument): их погрешность – около 3% в тропических и умеренных широтах, в высоких широтах погрешность больше. Не потеряли актуальности и наземные измерения ОСО, особенно высокоточные: они важны для градуировки и контроля спутниковых данных, а также для оценок долговременных изменений озонового слоя.

Для понимания природы озонового слоя, его аномалий и возможных изменений рассмотрим типичное вертикальное распределение озона (рис. 2). В соответствии с законом Бугера, интенсивность УФ-Б радиации, достигающей земной поверхности, зависит от общего числа молекул озона, находящихся в вертикальном столбе атмосферы. Оно пропорционально ОСО и на рис. 2 представляется в виде площади между кривой парциального давления озона p_3 , пропорционального счетной концентрации озона в млн м^{-3} , и вертикальной осью. Кроме p_3 , важно и отношение смеси озона r_3 : его вертикальный профиль имеет наглядный физический смысл, поскольку поток озона за счет турбулентного обмена направлен от большего отношения смеси к меньшему.

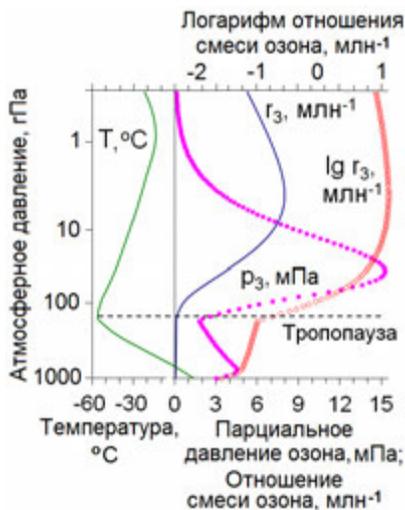


Рисунок 2. Типичное вертикальное распределение парциального давления озона p_3 , мПа, отношения смеси озона r_3 , млн⁻¹, его десятичного логарифма $\lg r_3$, а также температуры T , °C

В верхней стратосфере парциальное давление и отношение смеси озона в течение года относительно стабильны. Изменения ОСО связаны с изменениями в нижней стратосфере и могут вызываться как динамическими, так и (фото-)химическими факторами. Динамика атмосферы влияет, главным образом, на положение тропопаузы: при повышении высоты тропопаузы уменьшается толщина зоны с высоким уровнем p_3 , также уменьшается и ОСО. Такая ситуация может возникнуть, например, если в тропосферу приходит воздушная масса из более южных широт. Фотохимическое воздействие проявляется, если в определенном диапазоне высот возникают условия, ведущие к интенсивному разрушению молекул озона. Наиболее наглядно химическое разрушение озона проявляется в период "озоновой дыры" над Антарктидой: в диапазоне высот 15-24 км в вертикальных профилях как парциального давления, так и отношения смеси озона возникает провал (кривые 2 на рис. 3). По мнению многих исследователей (Solomon, 1999), разрушение озона происходит там на частицах полярных облаков, образующихся при температурах ниже 195 К, с участием молекул хлора и брома. Если сток озона сравнительно невелик, то провал может быть заметен только в вертикальных профилях парциального давления и необязательно – в профилях отношения смеси озона, как это видно на кривых 1 на рис. 3. Однако наличие провала в вертикальных профилях только парциального давления, как на кривых 1 на рис. 3, необязательно указывает на наличие стока озона в области провала: такой профиль может образоваться, например, если в стратосферу умеренных широт произойдет адвекция воздушной массы из более низких широт. Подобные профили часто встречаются на станциях, лежащих в широтном поясе 35-50° с.ш. Поэтому, чтобы обоснованно приписать наличие провала в вертикальном профиле парциального давления озона химическому разрушению требуются дополнительные обоснования (анализ синоптической ситуации и/или траекторий, данные о других малых составляющих атмосферы и пр.).

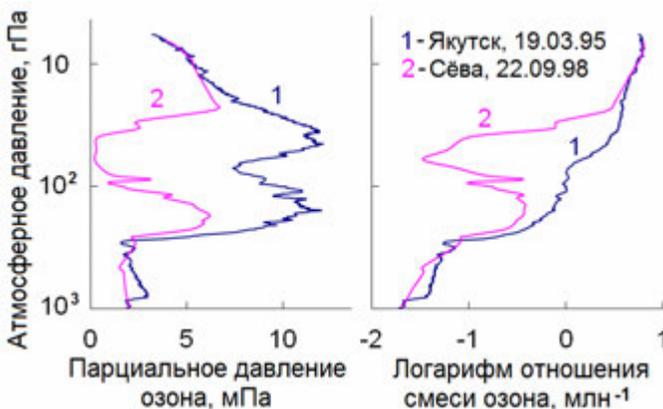


Рисунок 3. Вертикальные профили озона на станциях Сева (69 ю.ш., 40 в.д.) 22 сентября 1998 г. (1; ОСО=159 ед.Д.) и Якутск (62 с.ш., 130 в.д.) 19 марта 1995 г. (2; ОСО=310 ед.Д.) в единицах парциального давления озона p_3 , мПа, (слева) и отношения смеси озона $\lg r_3$, млн^{-1} (справа) (Черников и др., 2000)

Наиболее интенсивно изучают крупные аномалии озона, поскольку на них можно наиболее четко проследить, способны ли наши знания и модели описать реальные атмосферные процессы. Под крупными отрицательными аномалиями ОСО (далее – просто "аномалии") мы понимаем отрицательные отклонения от нормы, превышающие стандартное отклонение более чем в 2.5 раза (для суточных аномалий обычно – более чем на 25%). Более того, исследование озоновой аномалии, возникшей над Антарктидой в начале 1980-х гг. в весенний период, позволили значительно расширить наши знания о фотохимических процессах, определяющих состав атмосферы (Solomon, 1999). Среднее по земному шару ОСО составляет около 300 ед.Д. Для аномально низких значений ОСО (менее 220 ед.Д.) в весенний период над Антарктидой было введено понятие "озоновой дыры". Антарктическая "озоновая дыра" с начала 1980-х гг. ежегодно появляется в окрестности Южного полюса с августа и продолжается до ноября-декабря, занимая в максимуме площадь 20-30 млн. км². Минимальные ОСО в "озоновой дыре" были ниже 100 ед.Д. Ее характерная особенность – наличие провала в вертикальном профиле отношения смеси озона, как это иллюстрируется на рис. 3 (кривая 2); кроме как в Антарктической "озоновой дыре", больше нигде подобные провалы не наблюдаются. По аналогии с "озоновой дырой" было введено понятие "мини-дыры". Озоновыми "мини-дырами" назвали ситуации, сходные с "озоновыми дырами", при которых ОСО опускаются менее 220 ед.Д. В отличие от "озоновой дыры" "мини-дыры" кратковременны (до 1 недели), меньшей площади (до 3 млн. км²) и вызываются только особенностями атмосферной циркуляции, в частности, в представленном на рис. 4 случае – образованием мощного стратосферного циклона. Кроме Южного полушария, такие ситуации имеют место в Северном полушарии, обычно в широтном поясе 50-70°. Возникают они практически всегда осенью – в начале зимы над Северной Атлантикой в районе центра действия Исландского циклона, зональным потоком переносятся на север России (часто захватывая С.-Петербург) и затухают, не доходя до Урала. Эволюция одной из самых интенсивных озоновых "мини-дыр" проиллюстрирована на рис. 4.

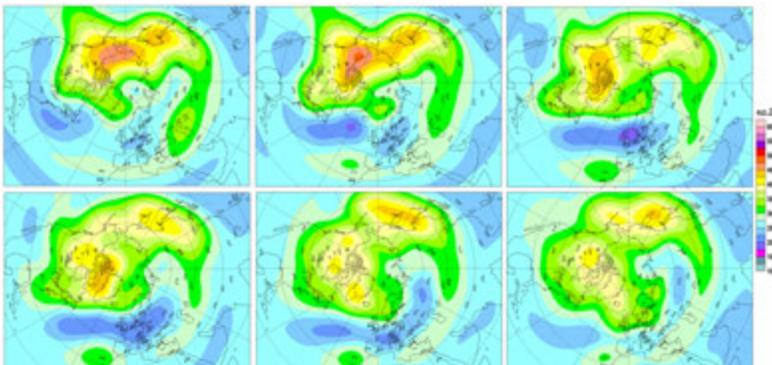


Рисунок 4. Образование, перемещение и разрушение озоновой "мини-дыры" в период с 28 ноября по 3 декабря 1999 г. (дни - последовательно слева направо и сверху вниз) по данным WOUDC

Минимальное ОСО 163 ед.Д. наблюдалось 30 ноября 1999 г. над Северным морем

Появление рекордных аномалий и/или изменение их повторяемости может явиться указанием на долговременные изменения в атмосфере. Вот почему появление первой за все время наблюдений в первом полугодии "мини-дыры" над севером Урала и Западной Сибири (рис. 5) вызывает вопрос о причинах и возможности повторения этого явления в будущем (Никифорова и др., 2017).

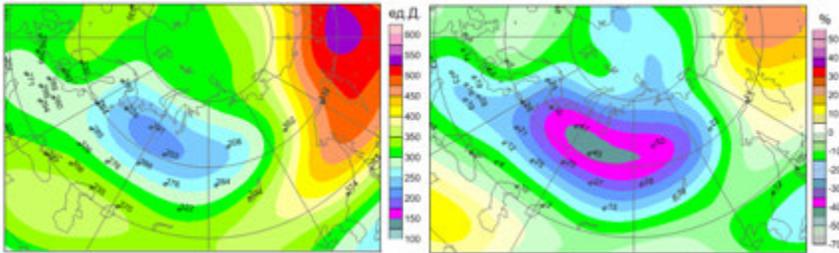


Рисунок 5. Поле общего содержания озона (ед.Д.; слева) 28 января 2016 г. и его отклонения (%; справа) от средних многолетних (1978-1988 г.г.) значений по данным WOUDC

Значительное внимание привлекают и более длительные значительные озоновые аномалии в Северном полушарии. Неожиданно возникшую в начале весны 2011 г. озоновую аномалию авторы (Manney et al., 2011) назвали первой в истории наблюдений "озоновой дырой" в Северном полушарии, хотя суточные ОСО в тот период нигде ниже 230 ед.Д. не опускались. Аномалия 1997 г. была не меньшей (рис. 6), и значительное число авторитетных исследователей, в частности, С. Соломон (Solomon, 1999), весеннюю аномалию 2011 г. "озоновой дырой" не посчитали. Тем не менее, озоновая аномалия 2011 г. и "мини-дыра" 2016 г. показали, что наше видение дальнейшей эволюции озонового слоя нуждается в уточнениях.

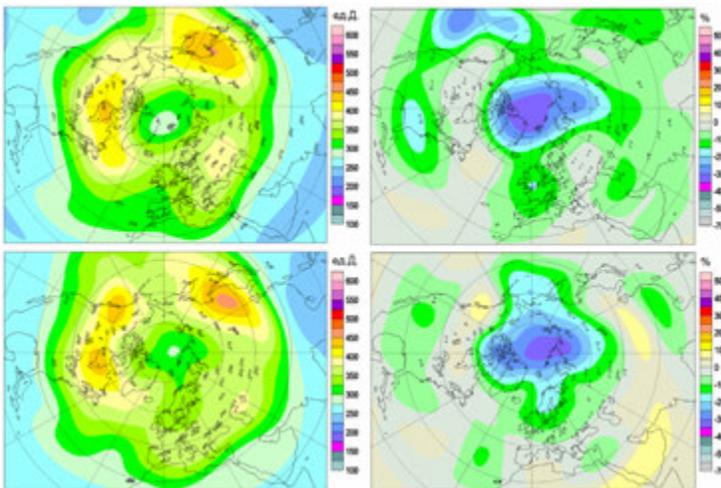


Рисунок 6. Распределение среднего в марте ОСО (слева; ед.Д) и его аномалии (справа; %) в 1997 (вверху) и 2011 (внизу) гг. по данным WOUDC

Долговременные изменения ОСО имеют, в основном, зональный характер и над территорией России практически не отличаются от происходящих в соответствующих широтных поясах шириной 5° (рис. 7). В экваториальной

области долговременные изменения ОСО статистически незначимы; в умеренных и высоких широтах обоих полушарий в период 1979-1996 гг. имел место значительный отрицательный тренд ОСО. Начиная с 1997 г., тренд ОСО на всех широтах статистически незначим (рис. 7 и 8) (Звягинцев и др., 2015). По заключению WMO (2014), в начале 2010-х гг. по данным спутниковых и наземных измерений содержание озона в умеренных и высоких широтах было ниже, чем в 1970-х гг. В частности, в широтном поясе 60° ю.ш. - 60° с.ш. оно было ниже на 2%, в умеренных широтах Северного полушария (35-60° с.ш.) – на 3.5% и в умеренных широтах Южного полушария (35-60° ю.ш.) – на 6%. Над различными регионами России ОСО падало в период 1979-1996 гг. (Кароль и др., 2006; Звягинцев и др., 2010); начиная с 1997 г., в поведении ОСО здесь можно увидеть лишь разнонаправленную межгодовую изменчивость. Наиболее сильное уменьшение ОСО в Северном полушарии произошло над севером центральной Сибири в районе п-ва Таймыр, там же, где наблюдаются и его самые сильные зимне-весенние аномалии (Manney et al., 2011; Никифорова и др., 2017). В глобальном масштабе сильнее всего с 1970-х гг. ОСО уменьшилось в высоких широтах Южного полушария, в области "озоновой дыры". Согласно модельным оценкам восстановление озонового слоя к уровню 1970-х гг. может быть достигнуто во второй половине нынешнего столетия, хотя неопределенности, связанные с понижением температуры стратосферы из-за увеличения концентраций парниковых газов, способны замедлить восстановление озонового слоя.

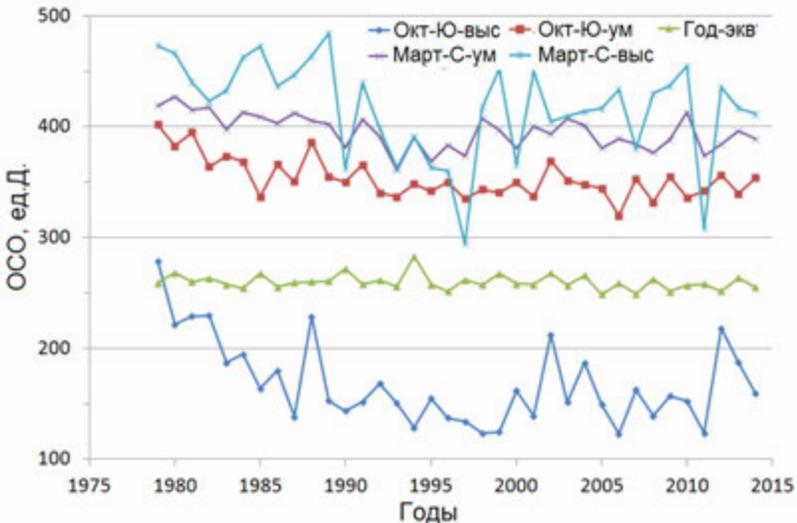


Рисунок 7. Межгодовой ход среднемесячных значений общего содержания озона, осредненных по широтным поясам 80-75° ю.ш. (Окт-Ю-выс) и 60-55° ю.ш. (Окт-Ю-ум) для октября, 55-60° с.ш. (Март-С-ум) и 75-80° с.ш. (Март-С-выс) для марта, а также среднегодовых по поясу 5° ю.ш. - 5° с.ш. (Год-экв) по данным TOMS/SBUV/OMI (Звягинцев и др., 2015)

TOMS (Total Ozone Mapping Spectrometer), SBUV (Solar Backscatter Ultraviolet Instrument) и OMI (Ozone Monitoring Instrument) — спутниковые-спектрометры для наблюдений глобального распределения ОСО; использованы данные TOMS за 1979-1994 гг. и 1996-2004 гг., OMI - 2005-2014 гг., SBUV - в период отсутствия работы TOMS и OMI

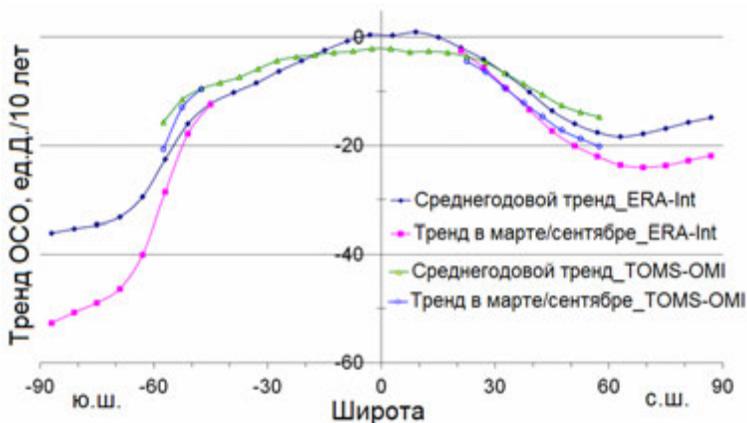


Рисунок 8. Линейный тренд ОСО в период 1979-1996 гг. с использованием баз данных Era-Interim и TOMS/SBUV/OMI для среднегодовых значений, а также для марта в Северном и сентября в Южном полушарии (Звягинцев и др., 2015)

Era-Interim - глобальная база реанализа метеорологических данных с 1979 г.

Европейского центра среднесрочных прогнозов (ECMWF),

Великобритания (<https://www.ecmwf.int/en/research/climate-reanalysis/era-interim>)

Наличие озонового слоя в атмосфере приводит к поглощению ультрафиолетовой (УФ) радиации, губительной для всего живого на Земле. Рис. 9 иллюстрирует, как озоновый слой защищает Землю от УФ радиации. Радиация с длиной волн от 315 до 280 нм (УФ-Б диапазон) оказывает наиболее сильное биологическое действие, связанное с непосредственным воздействием радиации на структуру молекулы белка. Высокие уровни УФ-Б радиации приводят к эритеме (покраснения кожи), раку кожи, катаракте. Национальная система мониторинга УФ радиации действует в ЦАО с 1990-х гг. (Иванова и др., 1999).

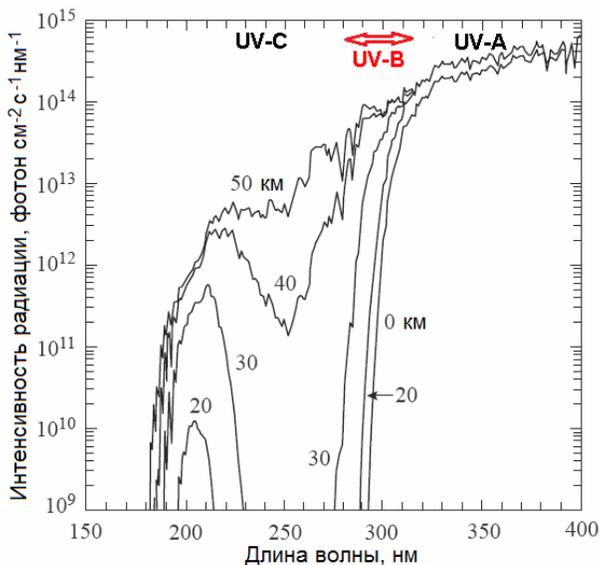


Рисунок 9. Спектр потока солнечной радиации в умеренных широтах на различных высотах (Jacob, 1999)

Уровень УФ радиации, зависящей от угла Солнца над горизонтом, ОСО и облачности, для информирования населения характеризуют значениями УФ индекса (УФИ). УФИ принимает значения от нуля и выше. Чем больше значение УФИ, тем выше потенциальная опасность для кожи и глаз человека, и тем меньше время, требуемое для причинения вреда здоровью. Опасными для здоровья считают значения УФИ, большие 6, которые наблюдаются в летний период даже в средней полосе России. Максимальные значения УФИ в Северном полушарии наблюдаются в районе полудня в июне-июле и составляют в Санкт-Петербурге 5-6, Москве 6-7, Берлине, Лондоне и Париже 7-8, Нью-Йорке 9, Лос-Анжелесе 10. Прогнозы значений УФ индекса на текущие и вторые сутки с указанием территории с опасным явлением и рекомендациями защитных мер для разных групп населения размещаются на сайте Гидрометцентра России. Некоторые дополнительные сведения об УФ радиации, УФ индексе и его прогнозировании можно найти в работе Нахаева и др. (2014).

Заключение

В России усилиями сети Росгидромета, ГГО, Гидрометцентра России и ЦАО проводится мониторинг ОСО и УФ радиации. Данные измерений ОСО на российских станциях представлены на сайте WOUDC (<http://exp-studies.tor.ec.gc.ca/>).

В период 1979-1996 гг. в умеренных и высоких широтах обоих полушарий наблюдалось уменьшение ОСО. С 1997 г. отмечается стабилизация уровня ОСО. Тенденции долговременных изменений ОСО над различными регионами России совпадают с тенденциями, наблюдаемыми в соответствующих зональных поясах. Надежно утверждать о начале восстановления уровней ОСО можно будет не ранее, чем через 10-15 лет. Вместе с тем возможно возникновение более сильных зимне-весенних аномалий, чем наблюдавшиеся в 1995-1997, 2005, 2011 и 2016 гг.

Национальная система мониторинга оперативно выявляет аномалии ОСО. Прогнозы УФ индекса, в т.ч., его опасных уровней, располагаются на сайте Гидрометцентра России (<http://meteoinfo.ru/>).

Список литературы

Александров Э.Л., Израэль Ю.А., Кароль И.Л. и др. 1992. Озонный щит Земли и его изменения. – СПб., Гидрометеиздат, 168 с.

Гущин Г.П., Соколенко С.А., Дудко Б.Г. и др. 1987. Новый малогабаритный озонметр М-124, предназначенный для измерений суммарного озона. – В кн.: Атмосферный озон. – Л., Гидрометеиздат, с. 49-56.

Звягинцев А.М., Ананьев Л.Б., Артамонова А.А., 2010. Изменчивость общего содержания озона над территорией России в 1973-2008 гг. – Оптика атмосферы и океана, т. 23, № 3, с. 190-195.

Звягинцев А.М., Варгин П.Н., Пешин С. 2015. Изменчивость и тренды общего содержания озона в период 1979-2014 гг. – *Оптика атмосферы и океана*, т. 28, № 9, с. 800-809.

Иванова Н.С., Крученицкий Г.М., Черников А.А., 1999. Создание первой очереди системы мониторинга УФ радиации в России. – *Оптика атмосферы и океана*, т. 12, № 1, с. 5-9.

Израэль Ю.А., Белокрыницкая Л.М., Дворецкая И.В. и др. 2014. Сравнение наземных и спутниковых измерений общего содержания озона. – *Метеорология и гидрология*, № 6, с. 85-98.

Кароль И.Л., Сыроваткина О.А., Соломатникова А.А. и др., 2006. Анализ межгодовых изменений общего содержания озона над территорией России в 1973-2002 гг. по данным измерений наземных станций. – *Метеорология и гидрология*, № 3, с. 19-28.

Нахаев М.И., Ананьев Л.Б., Иванова Н.С. и др. 2014. Ультрафиолетовая облученность, УФ-индекс и его прогнозирование. – *Труды Гидрометцентра России*, вып. 351, с. 173-187.

Никифорова М.П., Звягинцев А.М., Варгин П.Н. и др. 2017. Аномально низкие уровни общего содержания озона над севером Урала и Сибири в конце января 2016 г. – *Оптика атмосферы и океана*, т. 30, № 1, с. 12-19.

Перов С.П., Хргиан А.Х. 1980. Современные проблемы атмосферного озона. – Л., Гидрометеиздат. 288 с.

Черников А.А., Борисов Ю.А., Звягинцев А.М. и др. 2000. Изменчивость озонового слоя в период 1979-1999 гг. – *Оптика атмосферы и океана*, т. 13, № 1, с. 100-105.

Fioletov V.E., Labow G.J., Evans R. et al., 2008. Performance of the ground-based total ozone network assessed using satellite data. – *J. Geophys. Res.*, vol. 113, D14313.

Jacob D.J., 1999. *Introduction to Atmospheric Chemistry*. – Princeton, NJ, University Press, 266 p.

Solomon S., 1999. Stratospheric ozone depletion: A review of concepts and history. – *Rev. Geophys.*, vol. 37, pp. 275-316.

Solomon S., Ivy D.J., Kinnison D. et al., 2016. Emergence of healing in the Antarctic ozone layer. – *Science*, 10.1126/science.aae0061.

WMO, 1993. Ozone Report No. 31. Atlas of Total Ozone G030S Maps for the European Arctic Stratospheric Ozone Experiment (November 1991 - March 1992) – Geneve, WMO.

WMO, 2014. Ozone Report No. 54. Report of the Nineth Meeting of the Ozone Research Managers of the Parties to the Vienna Convention for the Protection of the Ozone Layer (Geneva, Switzerland, 14-16 May 2014). – Geneve, WMO.

WMO, 2015. Ozone Report No. 55. Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2014. – Geneve, WMO.

References

- Aleksandrov Je.L., Izrajel' Ju.A., Karol' I.L. et al. 1992. *Ozonnyj shhit Zemli i ego izmenenija* [Ozone shield of the Earth and its changes]. St. Petersburg, Gidrometeoizdat Publ., 168 p.
- Gushhin G.P., Sokolenko S.A., Dudko B.G. et al. 1987. Novyj malogabaritnyj ozonometr M-124, prednaznachennyj dlja izmerenij summarnogo ozona [New small-sized ozonometer M-124, intended for measurements of total ozone]. *Atmosfernyj ozon* [Atmospheric ozone]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., pp. 49-56.
- Zvjagincev A.M., Anan'ev L.B., Artamonova A.A., 2010. Izmenchivost' obshhego soderzhaniya ozona nad territoriej Rossii v 1973-2008 gg. [Variability of the total ozone content over the territory of Russia in 1973-2008]. *Optika atmosfery i okeana – Optics of the atmosphere and the ocean*, vol. 23, no. 3, pp. 190-195.
- Zvjagincev A.M., Vargin P.N., Peshin S. 2015. Izmenchivost' i trendy obshhego soderzhaniya ozona v period 1979-2014 gg. [Variability and trends of total ozone content in the period 1979-2014]. *Optika atmosfery i okeana – Optics of the atmosphere and the ocean*, vol. 28, no. 9, pp. 800-809.
- Ivanova N.S., Kruchenickij G.M., Chernikov A.A., 1999. Sozdanie pervoj ocheredi sistemy monitoringa UF radiacii v Rossii [Creation of the first stage of the UV radiation monitoring system in Russia]. *Optika atmosfery i okeana – Optics of the atmosphere and the ocean*, vol. 12, no. 1, pp. 5-9.
- Izrajel' Ju.A., Belokrinickaja L.M., Dvoreckaja I.V. et al. 2014. Sravnenie nazemnyh i sputnikovyh izmerenij obshhego soderzhaniya ozona [Comparison of terrestrial and satellite measurements of the total ozone content]. *Meteorologija i gidrologija – Meteorology and hydrology*, no. 6, p. 85-98.
- Karol' I.L., Syrovatkina O.A., Solomatnikova A.A. et al. 2006. Analiz mezhgodovyh izmenenij obshhego soderzhaniya ozona nad territoriej Rossii v 1973-2002 gg. po dannym izmerenij nazemnyh stancij [Analysis of interannual changes in the total ozone content over the territory of Russia in 1973-2002 according to measurements of ground stations]. *Meteorologija i gidrologija – Meteorology and hydrology*, no. 3, pp. 19-28.
- Nahaev M.I., Anan'ev L.B., Ivanova N.S. i dr. 2014. Ul'trafiioletovaja obluchennost', UF-indeks i ego prognozirovanie [Ultraviolet irradiation, UV index and its prediction]. *Trudy Gidrometcentra Rossii – Proceedings of the Hydrometeorological Center of Russia*, no. 351, pp. 173-187.
- Nikiforova M.P., Zvjagincev A.M., Vargin P.N. i dr. 2017. Anomal'no nizkie urovni obshhego soderzhaniya ozona nad severom Urala i Sibiri v konce janvarja 2016 g. [Anomalously low levels of total ozone over the north of the Urals and Siberia at the end of January 2016]. *Optika atmosfery i okeana – Optics of the atmosphere and the ocean*, vol. 30, no. 1, pp. 12-19.
-

Perov S.P., Hrgian A.H. 1980. *Sovremennye problemy atmosfernogo ozona* [Modern problems of atmospheric ozone]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 288 p.

Chernikov A.A., Borisov Ju.A., Zvjagincev A.M. i dr. 2000. *Izmenchivost' ozonovogo sloja v period 1979-1999 gg.* [Variability of the ozone layer in the period 1979-1999]. *Optika atmosfery i okeana – Optics of the Atmosphere and the Ocean*, vol. 13, no. 1, pp. 100-105.

Fioletov V.E., Labow G.J., Evans R. et al., 2008. Performance of the ground-based total ozone network assessed using satellite data. – *J. Geophys. Res.*, vol. 113, D14313.

Jacob D.J., 1999. *Introduction to Atmospheric Chemistry*. – Princeton, NJ, University Press, 266 p.

Solomon S., 1999. Stratospheric ozone depletion: A review of concepts and history. – *Rev. Geophys.*, vol. 37, pp. 275-316.

Solomon S., Ivy D.J., Kinnison D. et al., 2016. Emergence of healing in the Antarctic ozone layer. – *Science*, 10.1126/science.aae0061.

WMO, 1993. Ozone Report No. 31. Atlas of Total Ozone G030S Maps for the European Arctic Stratospheric Ozone Experiment (November 1991 - March 1992). – Geneve, WMO.

WMO, 2014. Ozone Report No. 54. Report of the Nineth Meeting of the Ozone Research Managers of the Parties to the Vienna Convention for the Protection of the Ozone Layer (Geneva, Switzerland, 14-16 May 2014). – Geneve, WMO.

WMO, 2015. Ozone Report No. 55. Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2014. – Geneve, WMO.

Статья поступила в редакцию: 24.04.2017 г.

После переработки: 27.05.2017 г.