

УДК 551.510.41

Аномалии атмосферного озона в феврале-марте 2018 г.

Н.С. Иванова¹, И.Н. Кузнецова², К.А. Сумерова²

¹ *Центральная аэрологическая обсерватория, г. Долгопрудный, Россия;*

² *Гидрометеорологический научно-исследовательский центр
Российской Федерации, г. Москва, Россия
muza@mecom.ru*

Обсуждаются наблюдавшиеся в зимне-весенний период 2018 года резкие колебания общего содержания озона (ОСО) в атмосфере и связанные с ними аномалии. В отличие от частых случаев образования дефицита ОСО, появление значительных положительных аномалий случается редко. В феврале-марте 2018 г. такое явление зафиксировано в северных регионах России с рекордным ростом ОСО над Таймыром (почти до 600 ед.Д.). Значительное накопление озона происходило в условиях восточной фазы квазидвухлетнего колебания при смещении циркумполярного вихря в полярные широты Западного полушария, что могло способствовать установлению аномально холодной погоды на большей части Европы. Образованию обширной положительной аномалии ОСО над Россией предшествовало внезапное стратосферное потепление как следствие повышения волновой активности и распространения тихоокеанских барических гребней в высокие широты.

В контексте дискуссий о восстановлении озонового слоя можно ожидать, что февральское накопление озона в атмосфере может оказать влияние на продолжение наметившегося в последнее десятилетие положительного тренда ОСО.

Ключевые слова: общее содержание озона, аномалия озона, циркумполярный вихрь, стратосферное потепление

Atmospheric ozone anomalies in February–March 2018

N.S. Ivanova¹, I.N. Kuznetsova², K.A. Sumerova²

¹ *Central Aerological Observatory, Dolgoprudny, Moscow region, Russia;*

² *Hydrometeorological Research Center of Russian
Federation, Moscow, Russia
muza@mecom.ru*

Dramatic variations in atmospheric total ozone (TO) observed in winter-spring of 2018 and related TO anomalies are discussed. In contrast to the frequent cases of TO deficiency, significant positive anomalies are rare. In February–March 2018 such phenomenon was observed in northern regions of Russia, with a record high TO increase over the Taimyr Peninsula (almost up to 600 DU). The considerable ozone accumulation occurred under conditions of the eastern phase of the quasi-biennial oscillation as the circumpolar vortex shifted towards the polar latitudes of the western hemisphere, thus possibly provoking abnormally cold weather in most of Europe. The formation of a large positive TO anomaly over Russia was preceded by a sudden stratospheric warming resulting from the wave activity growth and from the propagation of Pacific pressure ridges to the high latitudes.

In the context of discussions on the ozone layer recovery, it can be expected that the accumulation of atmospheric ozone in February will influence the recently observed positive trend in TO.

Keywords: total ozone, ozone anomaly, circumpolar vortex, stratospheric warming

Авторы посвящают свою работу светлой памяти Анатолия Михайловича Звягинцева – нашего коллеги и учителя, главного автора многих совместных научных публикаций

Введение

В середине 1990-х годов прошлого века в умеренных и высоких широтах Северного полушария было зарегистрировано существенное понижение среднегодовых значений общего содержания озона. В начале XXI столетия содержание озона в атмосфере возросло, но до сих пор в литературе ведутся дискуссии о перспективах и сроках восстановления озонового слоя до уровня 1974–1984 гг. [4, 8, 13, 19, 20, 22]. На рис. 1 показан временной ход среднегодовых значений ОСО в Санкт-Петербурге (60° с. ш., 30° в. д.) и Якутске (62° с. ш., 130° в. д.), рассчитанных по спутниковым данным. Видно, что в последние годы наметилось если не полное восстановление, то, по крайней мере, стабилизация ОСО.

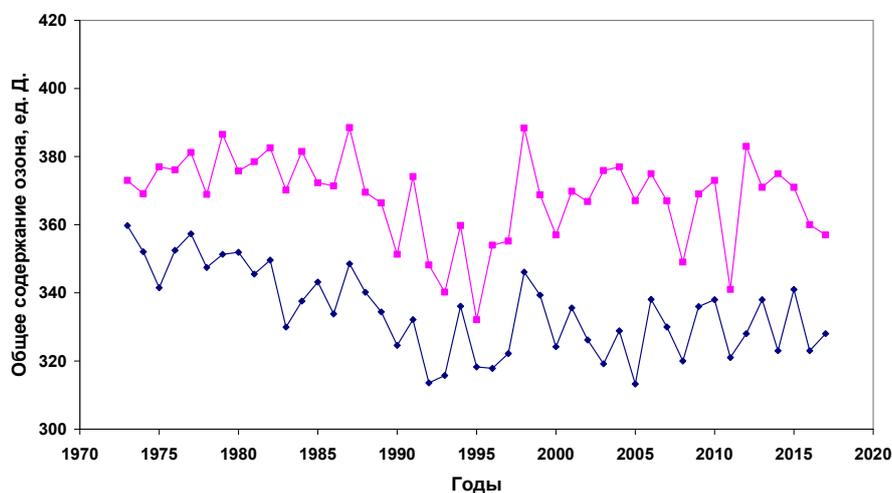


Рис. 1. Среднегодовые значения ОСО на станциях Якутск (красный цвет) и Санкт-Петербург (синий цвет).

Fig.1. Mean annual total ozone values at Yakutsk (red color) and St. Petersburg (blue color) stations.

На этом фоне образование обширных зон с положительной аномалией ОСО – достаточно редкое явление, которое заслуживает внимательного рассмотрения в контексте обсуждения скорости восстановления озонового слоя. В данной работе представлен анализ возникновения и развития положительной аномалии ОСО, наблюдавшейся над территорией России в феврале-марте 2018 года.

Обсуждение

По средним многолетним данным, которые принято считать за десятилетие 1974–1984 гг. (до начала глобального понижения ОСО), годовой максимум ОСО в северных регионах России отмечается в начале календарной весны. Вместе с тем, именно в зимне-весенний период в высоких и умеренных широтах Северного полушария практически ежегодно наблюдаются области дефицита озона разной интенсивности. Значительные отрицательные аномалии ОСО, превышающие 2,5 стандартных отклонения, иногда сохраняются до нескольких недель. Такие озоновые аномалии обусловлены интенсивным развитием циркумполярного вихря (ЦПВ) и связанным с ним понижением температуры в стратосфере. Понижение температуры стратосферы ниже -77°C приводит к образованию стратосферных облаков, на частицах которых под воздействием солнечного излучения восстанавливался активный хлор, способствующий разрушению озона [1, 11–16, 18]. Такие условия и явления способствовали образованию в высоких широтах Северного полушария в зимне-весенний период в 2011 и 2016 гг. обширных и продолжительных отрицательных аномалий ОСО [4, 13, 15, 18].

В отличие от образования зон дефицита ОСО, случаи появления в конце зимы – начале весны существенных положительных аномалий озона редки. Над территорией России за последние 20 лет наблюдалась всего одна продолжительная положительная озоновая аномалия, превышающая 2,5 стандартных отклонения, – в начале февраля 2009 г. Поэтому имевшая место в феврале-марте 2018 г. в северных регионах России положительная аномалия ОСО с рекордным ростом озона над Таймыром (почти до 600 ед. Д.) заслуживает внимательного анализа. Ее зарегистрировали шесть озонометрических станций Росгидромета: Тура (64° с. ш., 100° в. д.), Ханты-Мансийск (61° с. ш., 69° в. д.), Санкт-Петербург, Мурманск (69° с. ш., 33° в. д.), Архангельск (65° с. ш., 41° в. д.) и Печора (65° с. ш., 57° в. д.) (рис. 2). Возрастание ОСО на севере ЕТР и в Западной Сибири подтвердили данные спутниковой аппаратуры OMI (<http://avdc.gsfc.nasa.gov>). Отметим, что по результатам наших исследований [8] данные наземных измерений ОСО озонометрами M-124 несколько отличаются от спутниковых данных. Последние в среднем на несколько единиц Добсона меньше, чем данные приборов, используемых на озонометрической сети Росгидромета. По-видимому, определенный вклад в погрешность спутниковых измерений ОСО вносит облачность, на что обращают внимание исследования, обсуждаемые в [17].

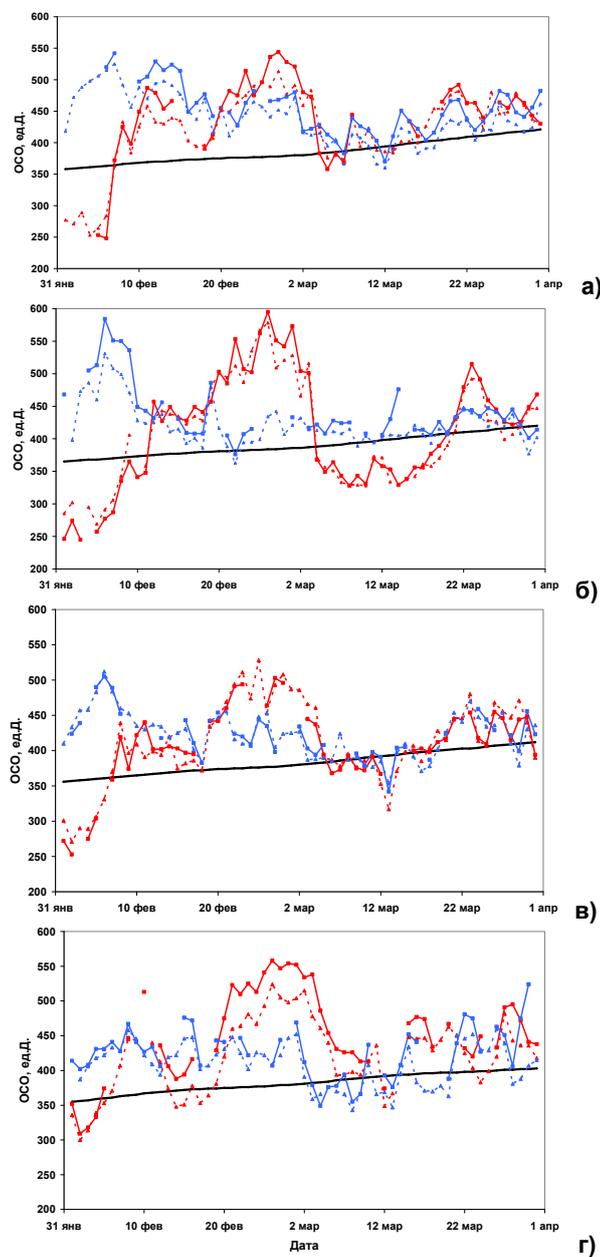


Рис. 2. ОСО (ед.Д.) в феврале-марте 2009 г. (синие линии) и 2018 г. (красные линии): Мурманск (а); Печора (б); Архангельск (в); С.-Петербург (г) (сплошные линии – измерения озонометром М-124, пунктирные – спутниковые измерения, двойная штриховая линия – норма ОСО).
Fig. 2. Total ozone (D.U.) in February - March 2009 (blue lines) and 2018 (red lines): Murmansk (a); Pechora (б); Arkhangelsk (в); St.Petersburg (г) (solid lines show M-124 ozonometer measurements, dashed lines – satellite measurements, and double dashed line – total ozone norm).

Для сравнения аномально высокое общее содержание озона в начале февраля 2009 г. было зарегистрировано на трех станциях озонометрической сети Росгидромета: в Мурманске, Архангельске и Печоре. Среднесуточное значение ОСО по измерениям прибором М-124 достигало 510–540 ед.Д. В Печоре ОСО возрастало до 585 ед.Д. и продолжалось 6 суток.

Изменчивость полярного ОСО, средней температуры стратосферы и площади полярного вихря в зимне-весенний период 2018 г. представлены на рис. 3, заимствованном с сайта NASA, США (<http://ozonewatch.gsfc.nasa.gov>). В принятой терминологии полярный озон – это среднее значение ОСО (ед.Д.) в поясе севернее 63° с. ш.; стратосферная температура – средняя температура (К) на уровне 50 гПа (около 20 км) севернее 60° с. ш. Площадь полярного (или циркумполярного) вихря – это площадь (млн. км²) замкнутого контура минимальной потенциальной завихренности над полярными широтами на изэнтропической поверхности 460 К.

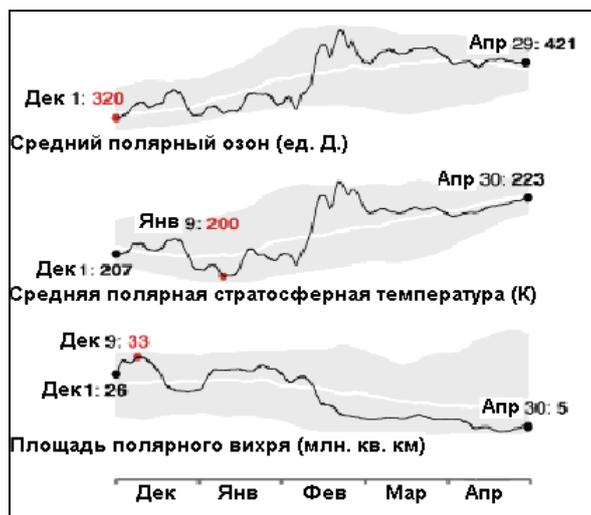


Рис. 3. Изменчивость полярного озона, полярной температуры и площади полярного вихря в период 1 декабря 2017 г. – 30 апреля 2018 г. Серым цветом выделена область изменчивости соответствующих параметров в предыдущие годы наблюдений. Рисунок заимствован с сайта NASA, США <http://ozonewatch.gsfc.nasa.gov>.

Fig. 3. Variability of polar ozone, polar temperature and polar vortex area during the period of December 1, 2017 – April 30, 2018. Grey color shows the area of the corresponding parameters' variability observed during the previous years. This figure is reproduced from the site of NASA, USA <http://ozonewatch.gsfc.nasa.gov>.

Как показано на рис. 3, в самом начале зимы 2017/2018 гг. наблюдалось значительное увеличение площади полярного вихря до 33 млн. км². Однако во второй половине декабря она резко – почти вдвое – уменьшилась до 19 млн. км². В январе площадь ЦПВ вновь увеличилась –

до 28–30 млн. км², немного превысив средние многолетние значения, и до середины февраля почти не менялась.

В конце первой декады января средняя температура воздуха над полярной шапкой (50 гПа) понизилась до минимального значения около 200 К с одновременным уменьшением ОСО до редко наблюдаемых в начале января величин (328 ед.Д.). Хотя более глубокий минимум полярного озона (около 325 ед.Д.) был зарегистрирован 29 декабря 2017 года, когда произошло первое резкое снижение температуры стратосферы на 9 градусов за 10 дней.

В конце января 2018 г. центр ЦПВ находился над архипелагом Шпицберген. Этому смещению циркумполярного вихря от полюса способствовали тихоокеанские антициклоны. Позже ЦПВ, принимая форму сначала овала, а затем «гантели», занял территорию от Гренландии до Западной Сибири. Увеличение мощности и размеров ЦПВ вызвало существенное понижение ОСО над российским сектором Арктики и Северной Атлантикой. В Мурманске, Архангельске и Печоре ОСО понизилось до 250 ед.Д., в С.-Петербурге – до 300 ед.Д. (рис. 2).

6 февраля началось внезапное стратосферное потепление (ВСП) (рис. 3). В это время в верхнюю стратосферу полярных широт распространялись мощные барические гребни с Тихого океана. Взаимодействуя с атлантическими антициклонами, они сместили циркумполярный вихрь на север Канады. Центр стратосферного антициклона при этом располагался над севером Сибири, аномалии геопотенциала вблизи его центра составляли примерно 140 дам. Усиливаясь и продвигаясь к полюсу, антициклоны вызвали повышение температуры в полярных районах: в верхней стратосфере (АТ-10) она оказалась более чем на 20 °С выше обычного значения для этого времени (до -30 °С). Стратосферный антициклон стал ослабевать только в третьей декаде февраля, при этом температура в полярных районах понизилась, но оставалась выше климатических значений.

В начале стратосферного потепления ЦПВ распался на два вихря. Малый вихрь сместился в умеренные широты и заполнился, а второй – главный – еще некоторое время располагался над севером Канады. Далее, ослабевая и уменьшаясь в размерах, вихрь продолжал смещаться в западном направлении. Обойдя вокруг полюса, ложбина ЦПВ сместилась в Восточное полушарие, а образовавшийся при этом максимум озона над Якутией сместился в западном направлении, что зарегистрировано на озонометрических станциях Росгидромета.

В конце февраля практически над всей территорией России ОСО было больше обычного, что иллюстрирует рис. 4, на котором показано поле ОСО на 24 февраля. В конце февраля и в первые дни марта на севере Европейской территории России (ЕТР) и в Сибири регистрировались не просто высокие значения ОСО, они превышали норму для этих дней более чем на 2,5 стандартных отклонения (рис. 2). Наибольшие значения

ОСО зафиксированы над территорией Ямала и Таймыра, где они превысили норму (средние значения за 1974–1984 гг.) на 45–50 %, приблизившись к 600 ед.Д.

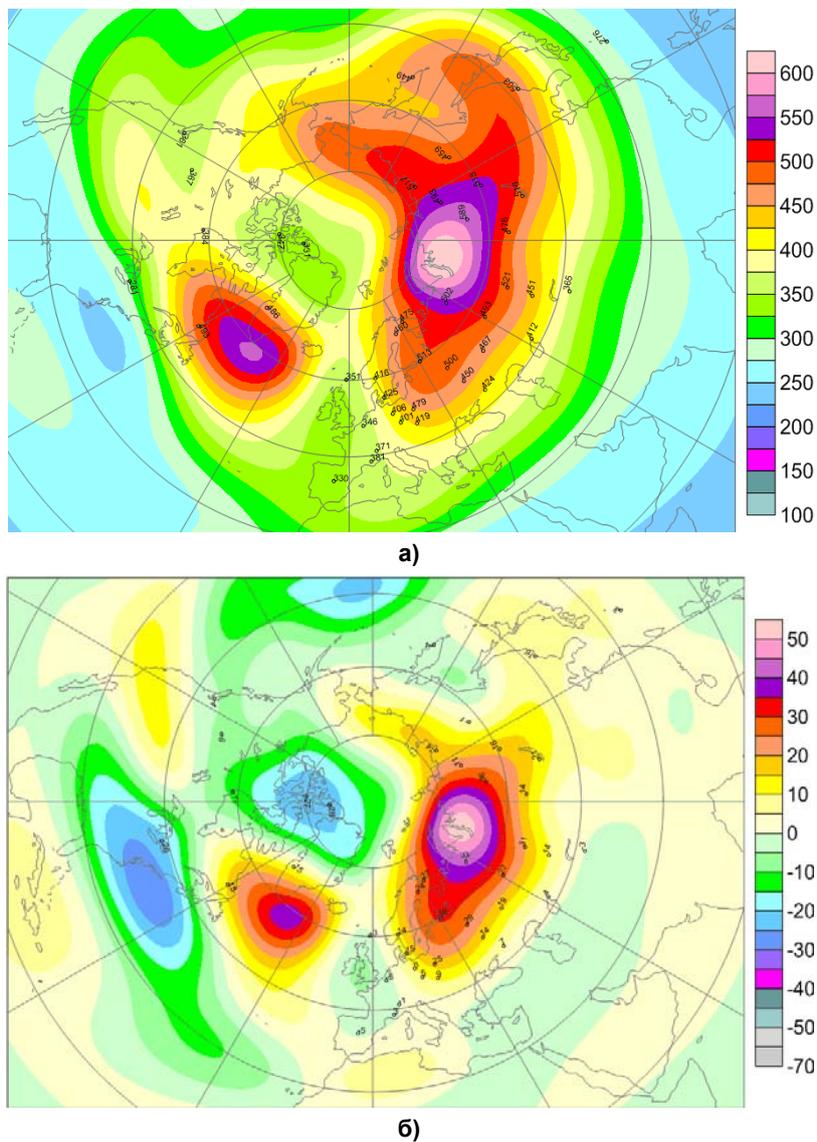


Рис. 4. Поле ОСО (ед.Д.), восстановленное по спутниковым и наземным измерениям (а) и отклонение от нормы, % (б). 24 февраля 2018 г. (<http://exp-studies.tor.ec.gc.ca/cgi-bin/selectMap>).

Fig.4. Maps of total ozone (D.U.) (a) and its deviations from the norm (%) (б) based on satellite and ground measurements of February 24, 2018 (<http://exp-studies.tor.ec.gc.ca/cgi-bin/selectMap>).

В средней тропосфере умеренных широт в целом по полушарию интенсивность меридиональной циркуляции в феврале оказалась выше нормы на 21 %. Индекс меридиональной циркуляции II естественного синоптического района (ЕСР) оказался выше на 38 %, а в высоких широтах III ЕСР – на 41 %. При этом в высоких широтах II и III ЕСР интенсивность зональной циркуляции была ослаблена на 94 и 55 %, соответственно. А в целом по полушарию индексы зональной циркуляции оказались близки к норме.

В начале марта началось заполнение ЦПВ, его площадь уменьшилась до 8 млн. км² и не менялась до начала апреля (рис. 3). ЦВП сместился на Карское море, затем в Западную Сибирь, что сопровождалось понижением ОСО по пути перемещения ослабевающего вихря.

На распределение озона в средних и высоких широтах Северного полушария существенное влияние оказывает квазидвухлетнее колебание (КДК) зональной составляющей экваториального стратосферного ветра [5, 6, 18]. При восточной фазе КДК в зимне-весенний период создаются условия для ослабления зонального ветра в средних и высоких широтах и усиления меридионального переноса, что приводит к значительному увеличению ОСО в этих широтах за счет усиления антициклогенеза в Арктике [2, 14].

Аномальный рост озона в атмосфере в конце зимы 2018 г., вызванный усилением волновой активности и последовавшего за этим мощного и продолжительного стратосферного потепления, происходил при восточной фазе экваториального квазидвухлетнего колебания. Некоторые исследователи отмечают, что увеличение волновой активности, как правило, происходит за 2–3 недели до начала внезапного стратосферного потепления [2, 10]. Восточная фаза КДК началась в марте 2017 г. на уровне 10 гПа, к началу 2018 г. снизилась до уровня 45 гПа, в мае – до 50 гПа [<http://geo.fu-berlin.de/en/met/ag/strat/produkte/qbo>]. Для сравнения с положительной аномалией ОСО в начале февраля 2009 г.: тогда восточная фаза КДК началась в июле 2008 г. на уровне 10 гПа, опустилась до уровня 70 гПа к маю 2010 года.

Многие авторы указывают также на связь между интенсивностью стратосферного полярного вихря и фазой приземного Арктического колебания (АК): полярный вихрь ослабевает при отрицательной фазе АК [2, 11]. Резкое снижение индекса АК имело место именно в последней декаде февраля 2018 г., ко 2 марта он опустился до -4,4. В это же время резко снизился и индекс Северо-Атлантического колебания (САК) – до -1,7. Информация об индексах АК и САК заимствована на сайте NOAA, США (<http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip>). В период положительной аномалии ОСО в феврале 2009 г. индекс Арктического колебания снижался до -3,2, а индекс Северо-Атлантического колебания – до -0,51.

При отрицательной фазе АК полярный вихрь ослабевает, что позволяет холодному воздуху проникать не только в центральные, но и

в южные широты Северного полушария. Нелинейная сложная связь процессов в стратосфере с типом погоды изучалась многими авторами (например, [2]). Холодная погода в феврале 2018 г. охватила почти всю Европу, а в конце месяца сюда пришел воздух из Сибири. В Центральной и Восточной Европе температура в отдельные дни февраля приближалась к $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, в горах Швейцарии температура понижалась до $-36\text{ }^{\circ}\text{C}$.

В высоких широтах была иная ситуация. В отличие от умеренных широт, в Арктике февраль выдался необычно теплым; например, на Земле Франца-Иосифа средняя за месяц температура оказалась выше нормы на $11\text{ }^{\circ}\text{C}$. Положительные аномалии приземной температуры в феврале отмечены над арктическими морями и севером Западной Сибири. В России от западных границ до Якутии в марте погода была холоднее обычной. Особенно большие отрицательные температурные аномалии сформировались на ЕТР: от Нижней Волги до побережья Баренцева моря температура была ниже нормы на $2\text{--}5^{\circ}$, а в Республике Коми – на 6° (<https://meteoinfo.ru/>).

Отметим, что резкие колебания ОСО в первые три месяца 2018 г. отразились в средних месячных величинах полярного озона и отклонениях от нормы: в январе при среднем ОСО 346 ед.Д, его оказалось на 20 % меньше нормы, в феврале – больше нормы на 14 % (при среднем за месяц ОСО 417 ед.Д.), в марте больше средних многолетних величин на 15 % (при среднем ОСО 439 ед.Д.). Примечательно, что в три следующих месяца 2018 г. содержание озона в полярной области совпадало со средними многолетними значениями.

Заключение

За последние 20 лет над территорией России зафиксированы всего две положительные озоновые аномалии, превысившие 2,5 стандартных отклонения: в начале февраля 2009 г. и в феврале-марте 2018 г. В 2018 г. аномалия ОСО наблюдалась на высоком фоне ОСО и его росте в области максимума почти до 600 ед.Д.

Формирование рекордной по интенсивности и площади положительной аномалии ОСО над территорией России в 2018 г. происходило, как и в 2009 г., при усилении меридиональной составляющей циркуляции на фоне восточной фазы КДК и отрицательных индексов АК и САК. Существенную роль в процессе накопления озона в северных и умеренных широтах Восточного полушария сыграло смещение циркумполярного вихря от полюса под влиянием тихоокеанских барических гребней, способствовавших резкому стратосферному потеплению.

По-видимому, февральское накопление озона в атмосфере в 2018 г. скажется на среднегодовом значении ОСО и продолжении наметившегося в последнее десятилетие положительного тренда ОСО.

Список литературы

1. Ананьев Л.Б., Звягинцев А.М., Кузнецова И.Н., Нахаев М.И. Особенности общего содержания озона и циркуляции в нижней стратосфере в зимне-весенний период 2011 года // Труды Гидрометцентра России. 2012. Вып. 347. С. 41-55.
2. Белинский В.А., Гараджа М.П., Меженная Л.М., Незваль Е.И. Ультрафиолетовая радиация Солнца и неба. М.: Изд-во МГУ, 1968. 228 с.
3. Варгин П.Н., Медведева И.В. Исследование температурного и динамического режимов внетропической атмосферы Северного полушария в период внезапного стратосферного потепления зимой 2012–2013 гг. // Известия РАН. ФАО. 2015. Т. 51, № 1. С. 20-38.
4. Звягинцев А.М., Варгин П.Н., Пешин С. Изменчивость и тренды общего содержания озона в период 1979–2014 гг. // Оптика атмосферы и океана. 2015. Т. 28, № 9. С. 800-809.
5. Звягинцев А.М., Иванова Н.С., Крученицкий Г.М., Губарчук И.В., Кузнецов Г.И. Содержание озона над территорией Российской Федерации в 2011 г. // Метеорология и гидрология. 2012. № 3. С. 112-118.
6. Звягинцев А.М., Крученицкий Г.М. О связях общего содержания озона в Северном полушарии с атмосферными колебаниями // Известия РАН. ФАО. 2003. Т. 39, № 4. С. 505-509.
7. Звягинцев А.М., Крученицкий Г.М. Озоновый кризис: 20 лет спустя (к юбилею подписания Венской конвенции) // Россия в окружающем мире: 2005 (Аналитический ежегодник). М.: Модус-К–Этериa, 2006. С. 125-145.
8. Звягинцев А.М., Кузнецова И.Н., Шалыгина И.Ю., Лезина Е.А., Лапченко В.А., Никифорова М.П., Демин В.И. Исследования и мониторинг приземного озона в России // Труды Гидрометцентра России. 2017. Вып. 365. С. 56-70
9. Иванова Н.С. Сравнение наземных и спутниковых результатов измерения общего содержания озона // Труды Гидрометцентра России. 2017. Вып. 365. С. 94-100.
10. Кашкин В.Б., Романов А.А., Рублева Т.В. Тренды общего содержания озона в 2005–2015 гг. по данным дистанционного зондирования // Оптика атмосферы и океана. 2016. Т. 29, № 9. С. 752-757.
11. Кочеткова О.С., Мордвинов В. И., Руднева М.А. Анализ факторов, влияющих на возникновение стратосферных потеплений // Оптика атмосферы и океана. 2014. Т. 27, № 8. С. 719-727.
12. Кулямин Д.В., Дымников В.П. Моделирование общей циркуляции тропосферы-стратосферы-мезосферы с включением D-слоя ионосферы // Гелиофизические исследования. 2014. Вып. 10. С. 5-44.
13. Ларин И.К. О восстановлении озонового слоя в северном полушарии в XXI веке // Химическая физика. 2015. Т. 34, № 1. С. 80-86.
14. Никифорова М.П., Варгин П.Н., Звягинцев А.М. и др. Озоновая «мини-дыра» над севером Урала и Сибири // Труды Гидрометцентра России. 2016. №. 360. С. 168-180.
15. Хайруллина Г.Р., Астафьева Н.М. Квазидвухлетние колебания в атмосфере Земли. Обзор: наблюдение и механизмы формирования. М.: Ин-т космических исслед., 2011. 60 с.
16. Arnone E., Castelli E., Papandrea E., Carlotti M., Dinelli B.M. Total depletion of ozone reached in the 2010–2011 Arctic winter as observed by MIPAS/ENVISAT using a 2-D tomographic approach // Atmos. Chem. Phys. 2012. Vol. 12. P. 9149-9165.
17. Duffey B.L. Solar ultraviolet radiation effects on biological systems // Phys. Med. Biol. 1991. Vol. 36. P. 299-328.
18. Liu X., Newchurch M.J., Kim J.H. Occurrence of ozone anomalies over cloudy areas in TOMS data // Atmos. Chem. Phys. 2003. Vol. 3. P. 1113-1129.
19. Manney G.L., Santee M.L., Rex M. et al. Unprecedented Arctic ozone loss in 2011 // Nature. 2011. Vol. 478. P. 469–475.
20. Steinbrecht W., Hassler B., Claude H., Winkler P., Stolarski R.S. Global distribution of total ozone and lower stratospheric temperature variations // Atmos. Chem. Phys. 2003. Vol. 3. P. 1421-1438.

21. Urbach F. Potential effects of altered solar ultraviolet radiation on human skin cancer // J. Photochem. Photobiol. 1989. Vol. 50, no. 4. P. 507-513.
22. Weber M., Coldewey-Egber M., Fioletov V.E., Frith S.M., Wild J.D., Burrows J.P., Long C.S., Loyola D. Total ozone trends from 1979 to 2016 derived from five merged observational datasets – the emergence into ozone recovery // Atmos. Chem. Phys. Discussions (ACPD). 2017. P. 1-37.
23. World Health Organization (WHO). Protection against exposure to ultraviolet radiation. Technical Report WHO/EHG 17. 1995.

References

1. Anan'ev L.B., Zvyagintsev A.M., Kuznetsova I.N., Nakhaev M.I. Osobennosti obschego sodержaniya ozona i tsirkulyatsii v nizhney stratosfere v zimne-vesenniy period 2011 goda. Trudy Gidromettsentra Rossii [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia], 2012, vol. 347, pp. 41-55. [in Russ.].
2. Belinskiy V.A., Garadzha M.P., Mezhen'naya L.M., Nezval' E.I. Ul'trafiol'tovaya radiatsiya Solntsa i neba. Moscow, MGU publ., 1968, 228 p. [in Russ.].
3. Vargin P.N., Medvedeva I.V. Temperature and dynamical regimes of the northern hemisphere extratropical atmosphere during sudden stratospheric warming in winter 2012–2013. *Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics*, 2015, vol. 51, no. 1, pp. 12-29.
4. Zvyagintsev A.M., Vargin P.N., Peshin S. Total Ozone Variations and Trends during the Period 1979–2014. *Atmospheric and Oceanic Optics*, 2015, vol. 28, no. 9, pp. 575–584.
5. Zvyagintsev A.M., Ivanova N.S., Gubarchuk I.V., Kruchenitskii G.M., Kuznetsov G.I. Ozone Content over the Russian Federation Territory in 2011. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2012, vol. 37, no. 3, pp. 210-215, DOI: 10.3103/S1068373912030090.
6. Zvyagintsev A.M., Kruchenitskii G.M. O svyazyakh obschego sodержaniya ozona v Severnom polusharii s atmosferyimi kolebaniyami. *Izvestiya RAN. Fizika atmosfery i okeana* [*Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics*]. 2003, vol. 39, no. 4, pp. 505-509. [in Russ.].
7. Zvyagintsev A.M., Kruchenitskii G.M. Ozonovyy krizis: 20 let spustya (k yubileyu podpisaniya Venskoy konventsii). Rossiya v okruzhayuschem mire 2005. Analiticheskiy ezhegodnik. Moscow, Modus-K–Ehteria publ., 2006, pp. 125-145. [in Russ.].
8. Zvyagintsev A.M., Kuznetsova I.N., Shalygina I.Y., Lezina E.A., Lapchenko V.A., Nikiforova M.P., Demin V.I. Investigation and monitoring of surface ozone in Russia. *Trudy Gidromettsentra Rossii* [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia], 2017, vol. 365, pp. 56-70. [in Russ.].
9. Zvyagintsev A.M., Vargin P.N. Russian studies of ozone layer in 2014-2016. *Trudy Gidromettsentra Rossii* [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia], 2017, vol. 365, pp.101-117. [in Russ.].
10. Kashkin V.B., Romanov A.A., Rubleva T.V. Trends of total ozone content according to remote sensing data in 2005–2015. *Optika Atmosfery i Okeana* [*Atmospheric and Oceanic Optics*], 2016, vol. 29, no. 9, pp. 752–757. [in Russ.].
11. Kochetkova O.S., Mordvinov V.I., Rudneva M.A. Analysis of the factors affecting the occurrence of stratospheric warming. *Optika Atmosfery i Okeana* [*Atmospheric and Oceanic Optics*], 2014, vol. 27, no. 8, pp. 719-727. [in Russ.].
12. Kulyamin D.V., Dymnikov V.P. Troposphere-stratosphere-mesosphere general circulation modelling with inclusion of the ionosphere D layer. *Geliogeofizicheskie issledovaniya* [*Heliogeophysical Research*], 2014, vol. 10, pp. 5-44. [in Russ.].
13. Larin I.K. On the recovery of the ozone layer in the northern hemisphere in the XXI century. *Russian Journal of Physical Chemistry B: Focus on Physics*, 2015, vol. 9, no. 1, pp. 157-162. DOI: 10.1134/S1990793115010066.
14. Nikiforova M.P., Vargin P.N., Zvyagintsev A.M., et al. Ozone «mini-hole» over the north of Ural and Siberia. *Trudy Gidromettsentra Rossii* [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia]. 2016, vol. 360, pp.168-180. [in Russ.].

15. *Khairullina G.R., Astafieva N.M.* Quasi-Biennial Oscillation of the Earth's Atmosphere. Review: Observations and Physical Mechanisms. Moscow: Space Research Institute publ., 2011, 60 p. [in Russ.].
16. *Arnone E., Castelli E., Papandrea E., Carlotti M., Dinelli B.M.* Total depletion of ozone reached in the 2010–2011 Arctic winter as observed by MIPAS/ENVISAT using a 2-D tomographic approach. *Atmos. Chem. Phys.*, 2012, no. 1, pp. 9149-9165.
17. *Diffey B.L.* Solar ultraviolet radiation effects on biological systems. *Phys. Med. Biol.*, 1991, no. 36, pp. 299-328.
18. *Liu X., Newchurch M.J., Kim J.H.* Occurrence of ozone anomalies over cloudy areas in TOMS data. *Atmos. Chem. Phys.*, 2003, vol. 3, pp. 1113-1129.
19. *Manney G.L., Santee M.L., Rex M. et al.* Unprecedented Arctic ozone loss in 2011. *Nature*, 2011, vol. 478, pp. 469–475.
20. *Steinbrecht W., Hassler B., Claude H., Winkler P., Stolarski R.S.* Global distribution of total ozone and lower stratospheric temperature variations. *Atmos. Chem. Phys.*, 2003, vol. 3, pp. 1421-1438.
21. *Urbach F.* Potential effects of altered solar ultraviolet radiation on human skin cancer. *J. Photochem. Photobiol.*, 1989, vol. 50, no. 4, pp. 507-513.
22. *Weber M., Coldewey-Egber M., Fioletov V.E., Frith S.M., Wild J.D., Burrows J.P., Long C.S., Loyola D.* Total ozone trends from 1979 to 2016 derived from five merged observational datasets – the emergence into ozone recovery. *Atmos. Chem. Phys. Discussions (ACPD)*, 2017, pp. 1-37.
23. World Health Organization (WHO). Protection against exposure to ultraviolet radiation. Technical Report WHO/EHG 17, 1995.

Поступила в редакцию 24.07.2018 г.
Received by the editor 24.07.2018.