

УДК 551.510.413.2

Аномально низкие уровни общего содержания озона над севером Урала и Сибири в конце января 2016 г.

М.П. Никифорова¹, А.М. Звягинцев², П.Н. Варгин², Н.С. Иванова²,
А.Н. Лукьянов², И.Н. Кузнецова^{3*}

¹Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского

299038, г. Севастополь, ул. Астана Кесаева, 14ж

²Центральная аэрологическая обсерватория Росгидромета
141700, г. Долгопрудный, Московская обл., ул. Первомайская, 3

³Гидрометцентр России
123242, г. Москва, Б. Предтеченский пер., 11–13

Поступила в редакцию 14.07.2016 г.

В конце января 2016 г. над севером Урала и Сибири впервые за весь период наблюдений с 1970-х гг. зарегистрированы значения общего содержания озона на уровне около 200 е.Д., что классифицируется как озоновая «мини-дыра». Проанализированы возможные причины и факторы возникновения аномально низких уровней общего содержания озона зимой 2016 г. в сравнении с рядом предыдущих зимних сезонов в Арктике с сильным разрушением озона. Показана доминирующая роль динамических факторов в образовании озоновой аномалии в конце января 2016 г., и высказано предположение о возможности появления в Арктике в будущем более значительных аномалий.

Ключевые слова: озоновая «мини-дыра», изменения озонового слоя, стратосферный полярный вихрь, динамика средней атмосферы; ozone “mini-hole”, ozone layer changes, stratospheric polar vortex, middle atmosphere dynamics.

Введение

Считается [1–4], что наблюдавшееся с начала 1980-х по конец 2000-х гг. истощение озонового слоя в глобальном масштабе закончилось и происходит его стабилизация или даже восстановление вследствие наблюдаемого с начала XXI в. уменьшения содержания в атмосфере озоноразрушающих соединений. Надежно установить признаки восстановления озонового слоя, согласно существующим оценкам, можно будет к середине текущего столетия [5, 6]. Среди других проблем исследования озонового слоя и его изменчивости одной из важнейших является вопрос межгодовой изменчивости динамики зимней стратосферы Арктики (см., например, [7]). Так, неожиданно возникшая крупнейшая в Северном полушарии озоновая аномалия весной 2011 г., наиболее сильно проявившаяся над севером Сибири [8–12], показала, что процессы, влияющие на изменчивость озонового слоя, требуют дальнейшего активного изучения, так как межгодовая изменчивость динамики

полярной стратосферы Арктики, определяющей характер разрушения стратосферного озонового слоя в зимний период, по-прежнему является малопредсказуемой. Это подтверждает и зимний сезон 2015/2016 г. с близкими к рекордно низким значениями температуры полярной стратосферы в декабре–январе, что привело к рекордно высокой площади полярных стратосферных облаков (ПСО) и, по предварительным оценкам, к существенному химическому разрушению стратосферного озона. Кроме того, в конце января 2016 г. над северными районами Урала и Сибири наблюдались аномально низкие значения общего содержания озона (ОСО) на уровне 200 е.Д. [13].

Целью настоящей статьи является описание этого эпизода, анализ возможных причин и факторов возникновения аномально низких уровней ОСО и обсуждение возможности появления в будущем более крупных озоновых аномалий в Арктике и над территорией России в частности.

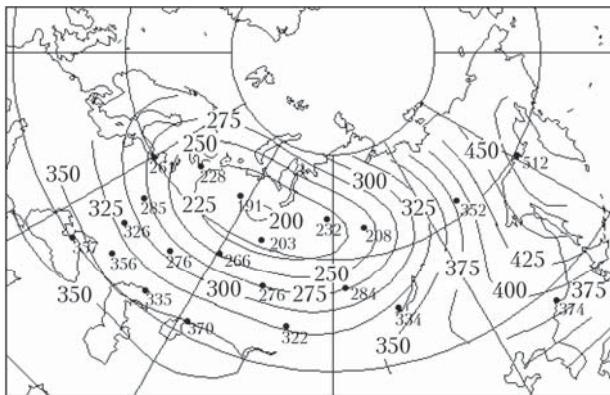
Результаты исследований

В работе проанализированы ежедневные данные наблюдений российской озонометрической сети, данные реанализа температуры, геопотенциальной высоты, зонального и меридионального ветра, потенциальной завихренности NCEP-Reanalysis и ERA-Interim,

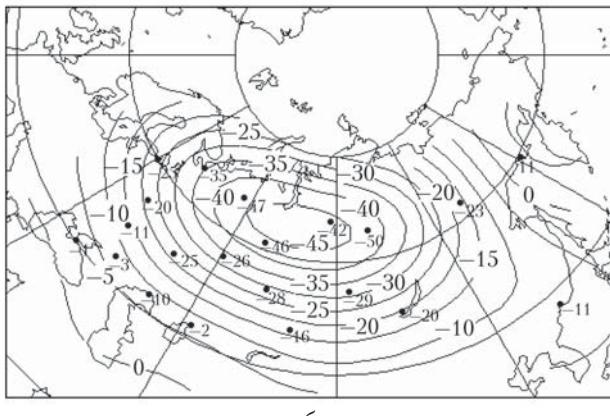
* Мария Павловна Никифорова (nikiforovamp@ya.ru); Анатолий Михайлович Звягинцев (zyagintsev45@yandex.ru); Павел Николаевич Варгин (p_vargin@mail.ru); Наталья Сергеевна Иванова (oom@cao-rhms.ru); Александр Николаевич Лукьянов (lukyanov@caomsk.mipt.ru); Ирина Николаевна Кузнецова (muza@mecom.ru).

а также спутниковые данные ОСО, измеренные инструментом OMI на американском спутнике AURA.

Чрезвычайно низкие значения ОСО 190–220 е.д. были зарегистрированы 27–31 января 2016 г. на четырех северных станциях российской озонометрической сети: Печора (65° с.ш., 57° в.д.), Ханты-Мансийск (61° с.ш., 69° в.д.), Туруханск (66° с.ш., 88° в.д.), Тура (64° с.ш., 100° в.д.) (рис. 1). Измерения проводились с помощью озонометров М-124 [14]. Качественно подобный временной ход ОСО был зарегистрирован в этот период и инструментом OMI со спутника AURA, но сами значения ОСО были на 20–30 е.д. выше, чем у наземных наблюдений.



a



б

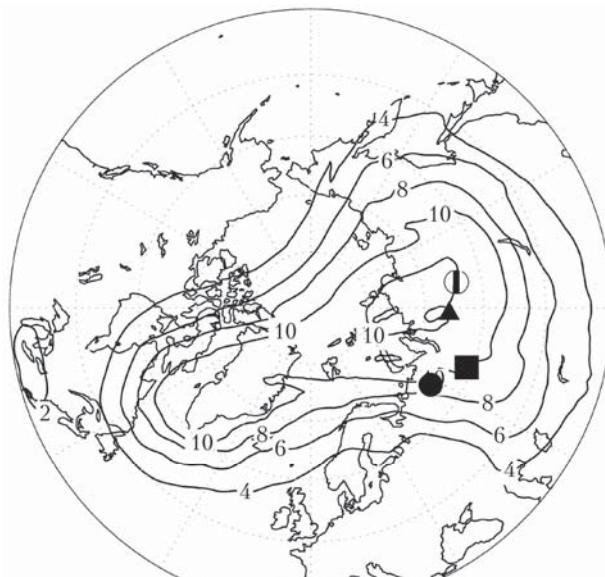
Рис. 1. Распределение ОСО (ед.д.) (а) и его отклонений от нормы (%) (б) над территорией России 28 января 2016 г. по данным наблюдений на российской озонометрической сети

Площадью озоновой «дыры» над Антарктидой считают площадь территории, над которой ОСО составляет менее 220 е.д. Поэтому можно утверждать, что в период 27–31 января 2016 г. над севером Урала и Сибири наблюдалась озоновая «мини-дыра» [15, 16]. Озоновые «мини-дыры», наблюдавшиеся в Северном полушарии, отличаются от антарктической озоновой «дыры» [17] прежде всего площадью (до 3 млн км^2 , т.е. примерно на порядок меньше, чем в Антарктиде), продолжительностью существования (до 5 сут вместо нескольких месяцев), нерегулярностью появления (в Антарктиде с начала 1980-х гг. озоновая «дыра» наблюдается ежегодно с августа

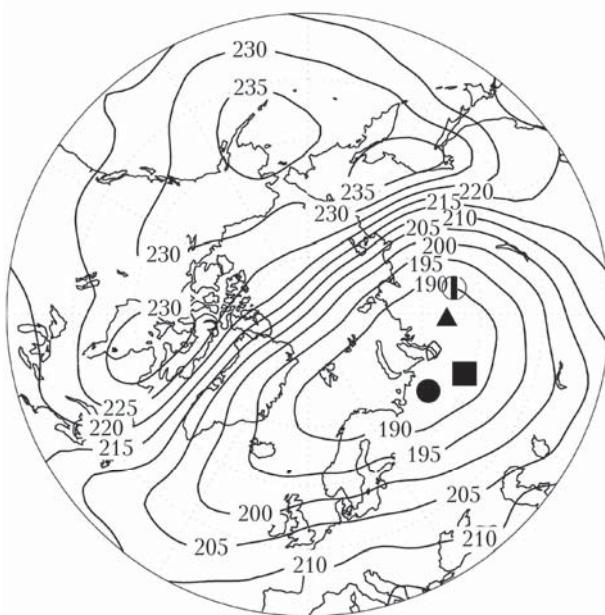
по ноябрь–декабрь). Подавляющее большинство озональных «мини-дыр» в Северном полушарии возникают в период сезонного минимума ОСО в октябре–ноябре над Северной Атлантикой и перемещаются с зональными потоками на восток, затягиваясь обычно до Уральского меридиана ($\sim 60^{\circ}$ в.д.), но иногда доходят и до северных районов Сибири [15, 18]. В отличие от известной антарктической озоновой «дыры» [17, 19, 20], причиной таких «мини-дыр» являются существенные аномалии крупномасштабных атмосферных процессов [21–23]. Самые глубокие «мини-дыры» возникают, когда образуется ситуация с высоким и теплым тропосферным антициклоном, располагающимся под циклоном в стратосфере [22, 24].

За все время измерений с 1973 г., анализируемых специалистами Центральной аэрологической обсерватории, никогда прежде не наблюдалось озональных «мини-дыр», зарегистрированных одновременно более чем на одной станции национальной озонометрической сети в первой половине года. Хотя в отдельные годы с февраля по апрель над территорией России и регистрировались значительные озональные аномалии [8, 12, 25], когда дефицит ОСО доходил почти до 50% от «климатической» нормы (определенной как среднее за период 1973–1984 гг.), но ОСО оставалось выше 220 е.д.

Существенные отклонения ОСО от нормы в высоких широтах Северного полушария были зафиксированы уже в начале зимы 2015–2016 г. Над российским сектором Арктики в декабре 2015 г. временами регистрировались области с дефицитом ОСО 20–30% относительно нормы, но ОСО оставалось выше 250 е.д. Первые признаки возникновения озональной «мини-дыры» над территорией России появились в последнюю неделю января: на нескольких северных станциях значения ОСО опустились ниже 240 е.д. Ежегодно наблюдаемый в этот период циркумполярный вихрь (ЦПВ) [26] к этому времени достиг максимальной интенсивности, имел вытянутую конфигурацию с центром над Таймыром и сильно выраженную термическую асимметрию и неоднородность (рис. 2). Внутри ЦПВ в средней и нижней стратосфере область экстремально низких температур $-80\ldots-90^{\circ}\text{C}$ и ниже располагалась над полярным кругом, Гренландией, севером Атлантики и Европы; ложина аномального холода наблюдалась над севером Евразии, охватив большую часть Урала и Сибири, вторая ложина аномального низкой температуры — на севере Атлантики. Отклонения температуры от нормы достигли в средней стратосфере на 10 гПа -30°K и в нижней стратосфере на 50 гПа -20°K . Максимум площади «мини-дыры» отмечен 28 января — он составил почти 3 млн km^2 , а ОСО уменьшилось до экстремально низких величин. Так, в области стратосферного минимума температуры — на озонометрических станциях Печора, Ханты-Мансийск, Туруханск, Тура — по измерениям с помощью озонометров М-124 значения ОСО составили 190–220 е.д. (рис. 1, 3). На рис. 2 для 28 января представлены потенциальная завихренность на уровне потенциальной температуры 530 К, используемая для диагностики стратосферного полярного



a



б

Рис. 2. Потенциальная завихренность (10^{-6}) на уровне потенциальной температуры 530 К (~25 км) (*а*) и температура (К) на изобарической поверхности 30 гПа (~25 км) (*б*) 28 января 2016 г. Значками отмечено расположение наземных станций наблюдения за состоянием озонового слоя: круг — Печора, квадрат — Ханты-Мансийск, треугольник — Туруханск, круг с вертикальной чертой — Тура. Данные потенциальной завихренности — Era-Interim, температуры — NCEP-Reanalysis

вихря, и температура на уровне давления 30 гПа (~25 км высоты). Видно, что все четыре станции — Печора, Ханты-Мансийск, Туруханск, Тура — находились в области минимальных температур внутри стрatosферного полярного вихря.

Озоновая «мини-дыра» просуществовала недолго: в конце января произошло минорное внезапное

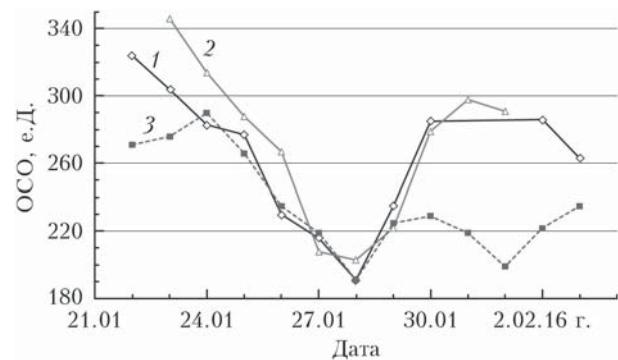


Рис. 3. Ход ОСО по данным измерений с помощью наземных озонометров М-124 на станциях Печора (1) и Ханты-Мансийск (2) в период 22 января — 3 февраля 2016 г., а также минимум ОСО, измеренный инструментом ОМИ на спутнике AURA в широтном поясе 50–90° с.ш. (3) [27]

стратосферное потепление (ВСП), температура нижней полярной стратосфера в области высот 20–25 км увеличилась примерно на 10 °C, площадь «мини-дыры» существенно сократилась. 1 февраля значения ОСО на всех перечисленных станциях уже заметно превышали 220 е.Д.; тем не менее они над этой областью по-прежнему оставались на 20–30% меньше климатической нормы.

Все аномалии озона, наблюдавшиеся над северными областями России в зимне-весенний период, возникали в условиях малоподвижного устойчивого, мощного ЦПВ, в которых часть вихря над Сибирью была больше части над Канадой. Внутри ЦПВ благодаря выхолаживанию и изоляции температура опускается ниже -78°C — порога образования ПСО, гетерогенные реакции на которые (прежде всего, с хлорсодержащими соединениями) ответственны за разрушение стратосферного озона [17]. А накануне и во время озоновой «мини-дыры» на высотах выше 18 км температура опускалась ниже порогового значения образования ПСО 2-го типа (ледяных частиц), т.е. ниже -85°C (рис. 4), что в конечном итоге приводит к разрушению озона [1, 17] и характерно для зимней стратосферы Антарктики [19, 20].

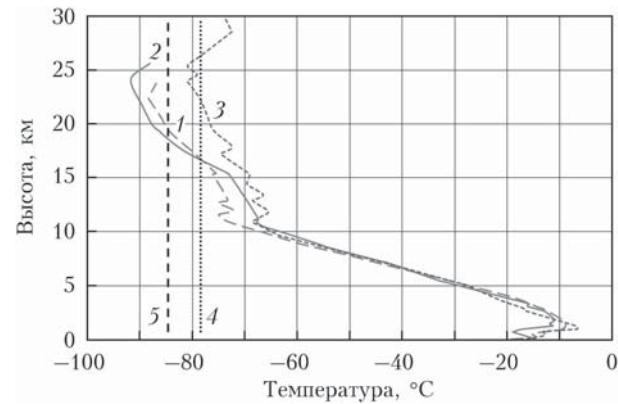


Рис. 4. Вертикальные профили температуры на ст. Салехард (66° с.ш., 66° в.д.) по результатам радиозондирования 25 января (1), 28 января (2) и 1 февраля (3) 2016 г. в 00:00. Вертикальные прямые — температуры, при которых образуются полярные стратосферные облака 1-го (4; -78°C) и 2-го типа (5; -85°C)

Зима 2015/2016 г. в стратосфере Арктики значительную часть декабря и января характеризовалась рекордно низкими температурами [27, 28], что, соответственно, способствовало возникновению рекордной площади ПСО (17 млн км² к концу января; для сравнения, соответствующая максимальная площадь над Антарктидой в годы максимальных озоновых «дыр» составляла ~ 30 млн км²). Резкое и мощное понижение температуры нижней стратосферы стало причиной значительных отклонений стратификации температуры от «климатического» профиля. В первую очередь это касается разрушения слоя термической тропопаузы, которая в обычных сезонных условиях на некоторое время практически исчезала. На рис. 4 показаны вертикальные профили температуры вблизи центра температурной аномалии в ЦПВ – в Салехарде (66° с.ш., 66° в.д.) – до, в период максимального развития и после озоновой «мини-дыры» [29]. Отметим, что в период экстремально низкого ОСО тропопауза, обычно располагаясь на высотах 8–10 км, имела здесь лишь формальные признаки. На вертикальном профиле температуры на рис. 4 для 28 января высота первой тропопаузы, согласно ее формальному определению Всемирной метеорологической организации (минимальная высота, на которой вертикальный градиент температуры падает до $2 \text{ К} \cdot \text{км}^{-1}$ или ниже и среднее значение этого параметра в вышележащем слое толщиной 2 км не превышает $2 \text{ К} \cdot \text{км}^{-1}$), составила 10,9 км, второй – 20,0 км (вторая тропопауза возникает, если над первой тропопаузой в некоторой области высот, большей 2 км, вертикальный градиент превышает $3 \text{ К} \cdot \text{км}^{-1}$). В промежуточной между тропопаузами области высот вертикальный градиент температуры составил в среднем $-2,2 \text{ К} \cdot \text{км}^{-1}$. Явное приращение температуры с высотой произошло лишь выше 24 км.

Хорошо известно [30], что над тропопаузой происходит резкое увеличение отношения смеси озона примерно с $0,1 \text{ млн}^{-1}$ на высоте тропопаузы до почти 10 млн^{-1} на высоте 25 км; наибольший вклад в ОСО (существенно больше 50%) вносит область высот от выше 5 км над тропопаузой до ~ 28 км. Согласно климатологии вертикальных профилей озона при наличии второй тропопаузы [31] рост отношения смеси озона, а значит, и его счетной концентрации, непосредственно формирующей вклад в ОСО, выше первой тропопаузы существенно замедляется и лишь с высоты ~ 28 км счетная концентрация озона почти не зависит от наличия или отсутствия второй тропопаузы. Поэтому результаты радиозондирования атмосферы, изображенные на рис. 4, указывают на существование минимума ОСО в середине последней недели января.

Рассматриваемые крайне низкие значения ОСО могут быть обусловлены как химическим разрушением озона, так и динамическими процессами внутри ЦПВ [11]. Несмотря на наличие крайне низких температур и значительную площадь образовавшихся ПСО 1-го и 2-го типов в арктической стратосфере, крайне маловероятно, что озоновая «мини-дыра» в конце января могла быть вызвана преимущественно

химическими потерями. Согласно предварительным оценкам, потери ОСО, связанные с химическим разрушением озона в стратосфере Арктики, к концу января 2016 г. составили не более 15 е.Д. [32] из общего дефицита 70–100 е.Д. (см. рис. 1). Над Антарктидой заметные химические потери озона начинают наблюдаться только с августа (соответствует февралю над Арктикой). Кроме того, известные скорости химического разрушения озона слишком малы [24], чтобы обосновать скорость уменьшения ОСО около 25 е.Д. в сутки в период 24–28 января (см. рис. 3); в Антарктической стратосфере с середины августа по конец сентября минимальное ОСО уменьшается с почти постоянной скоростью менее 4 е.Д./сут. С химическими процессами несомненно и объяснение восстановления ОСО до практически прежних величин после 28 января, поскольку область «мини-дыры» продолжала находиться внутри ЦПВ. Поэтому основной причиной образования озоновой «мини-дыры» в конце января 2016 г. могут быть, по-видимому, аномалии динамики стратосферы, вызванные вертикальными движениями в ЦПВ.

С целью исследования происхождения воздушных масс в области озоновой «мини-дыры» был проведен траекторный анализ. Для расчета обратных траекторий, приходящих в точку наблюдения, использовались траекторная модель [33] и данные ре-анализа ERA-Interim. Пятидневные траектории рассчитывались на уровнях давления 70, 50, 30 и 20 гПа для ст. Печора 28 января 2016 г. Траектории на всех уровнях находились внутри полярного стратосферного вихря. Несмотря на то что в среднем внутри вихря происходит медленное неадиабатическое оседание воздушных масс, рассчитанные траектории указывают на локальный адиабатический подъем воздушных масс (рис. 5, *a*) с понижением температуры (рис. 5, *b*) за полтора дня до прихода в точку наблюдения. Как правило, подъем воздушных масс в стратосфере приводит к уменьшению ОСО [24, 30], что, вероятно, проявилось и в данном случае. Кроме того, такие восходящие движения должны были бы привести и к аномально низким температурам. Траектории, рассчитанные для ст. Печора до и после 28 января, такого восходящего движения с понижением температуры не демонстрировали.

Аномалия ОСО над северными районами России в январе 2016 г. наблюдалась, как и в 1995, 2009, 2011 и другие годы, при западной фазе квазидвухлетних колебаний ветра в экваториальной стратосфере, при которой значения ОСО обычно меньше нормы на 6–8% [25]. Известно, что западная фаза квазидвухлетних колебаний ветра обычно приводит к более сильному стратосферному полярному вихрю (или ЦПВ) вследствие благоприятных условий для распространения потоков волновой активности в стратосфере в направлении низких широт [34]. Вероятно, это явилось одной из дополнительных причин столь мощного ЦПВ.

Несмотря на минорное ВСП в конце января – начале и середине февраля и главное ВСП в конце февраля – начале марта, потери ОСО, связанные

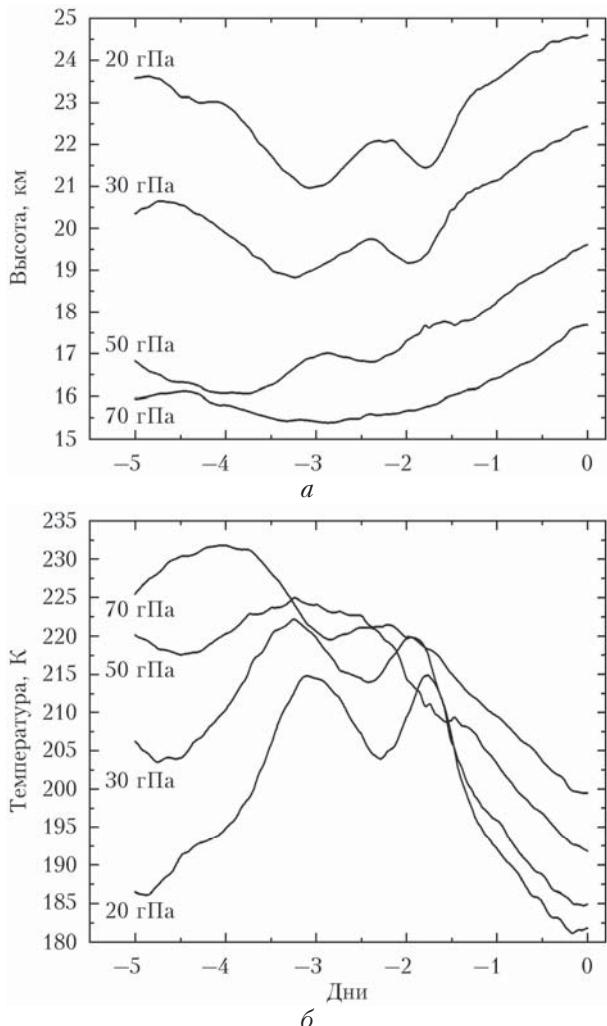


Рис. 5. Изменения высоты (а) и температуры (б) вдоль пятидневных обратных траекторий, рассчитанных с высотных уровней 70, 50, 30 и 20 гПа над ст. Печора (65° с.ш., 57° в.д.) 28 января 2016 г.

с химическим разрушением озона в стратосфере Арктики, в целом за зимний сезон 2015/2016 г., по предварительным оценкам, составили $\sim 28\%$ и оказались по величине третьими после соответствующих потерь в зимние сезоны 1994/1995 г. (30%) и 2010/2011 г. (38%) [32]. К числу благоприятных для изоляции и усиления ЦПВ факторов зимой 2015/2016 г. следует отнести и заниженное распространение потоков волновой активности из тропосферы в стратосферу в начале зимнего сезона [35], что обеспечило устойчивость циркумполярного вихря до конца февраля – начала марта 2016 г., когда произошло главное ВСП, ставшее одновременно и финальным (т.е. завершившим период зимней зональной циркуляции стратосферы).

Из-за неожиданного возникновения озоновых аномалий 2011 и 2016 гг. в Арктике и над территорией России естественен вопрос: можно ли ожидать повторения или даже углубления подобных аномалий в будущем. При этом ясно, что в ближайшие несколько десятилетий появление озоновой «дыры»

над Арктикой, сопоставимой с антарктической, маловероятно [19, 20], тем более, что содержание озоноразрушающих соединений в стратосфере понижается. В то же время тенденции изменений метеопараметров, в первую очередь температуры, в стратосфере над Арктикой [36–42] представляются весьма неопределенными. Это, в частности, может быть проиллюстрировано при сравнении распределений аномалий средней температуры в январе на изобарической поверхности 30 гПа для ряда годов с наиболее интенсивными ЦПВ в последние два десятилетия по данным [28] (рис. 6). Видно, что в январе климатический минимум температуры в стратосфере располагается вблизи середины между архипелагом Шпицберген и российско-норвежской континентальной границей, над севером Урала средняя температура примерно на 7°C выше, чем в этом минимуме, но и на 7°C ниже, чем минимальная температура над севером материковой Канады (в ее восточной части).

Центры отрицательных температурных аномалий в стратосфере в январях 1996, 2000 и 2005 гг. располагались вблизи севера материковой Канады, но сами стратосферные температуры здесь в это время были почти такими же низкими, как над севером Урала и Сибири. Центр отрицательной температурной аномалии в стратосфере в январе 2011 г. располагался уже над Северным Ледовитым океаном между полюсом и побережьем Сибири, а центр аномалии в январе 2016 г., причем максимальной по интенсивности (отклонение ниже -18°C , что и вызвало рекордную отрицательную температуру), располагался уже над севером материковой Западной Сибири. По эволюции температурных аномалий, изображенных на рис. 6, можно видеть, что температуры над российским сектором Арктики существенно понижались (по крайней мере, в годы, когда наблюдалась наиболее сильные аномалии ОСО), создавая, таким образом, условия для появления более интенсивных озоновых аномалий, и в будущем возможны еще более крупные аномалии, которые могут распространяться и на следующие после января месяцы. Некоторые другие признаки интенсификации ЦПВ в Арктике, уменьшения стратосферных температур, приводящих к росту количества полярных стратосферных облаков с годами и др., можно найти на сайте [27]. Сдерживание усиления ЦПВ и его разрушение в зимне-весенний период происходят за счет усиления распространения волновой активности из тропосферы в стратосферу, приводящего к возникновению ВСП, однако тенденции этих факторов остаются неопределенными.

Ожидаемое изменение климата, сопровождающее снижение температуры стратосферы из-за роста концентрации парниковых газов [43], а также изменения стратосферного озона могут повлиять на частоту и период возникновения ВСП.

Таким образом, не исключено, что, несмотря на наблюдаемое снижение содержания в атмосфере озоноразрушающих соединений, в будущем, прежде всего в годы с западной фазой квазидвухлетних колебаний, при невысокой волновой активности

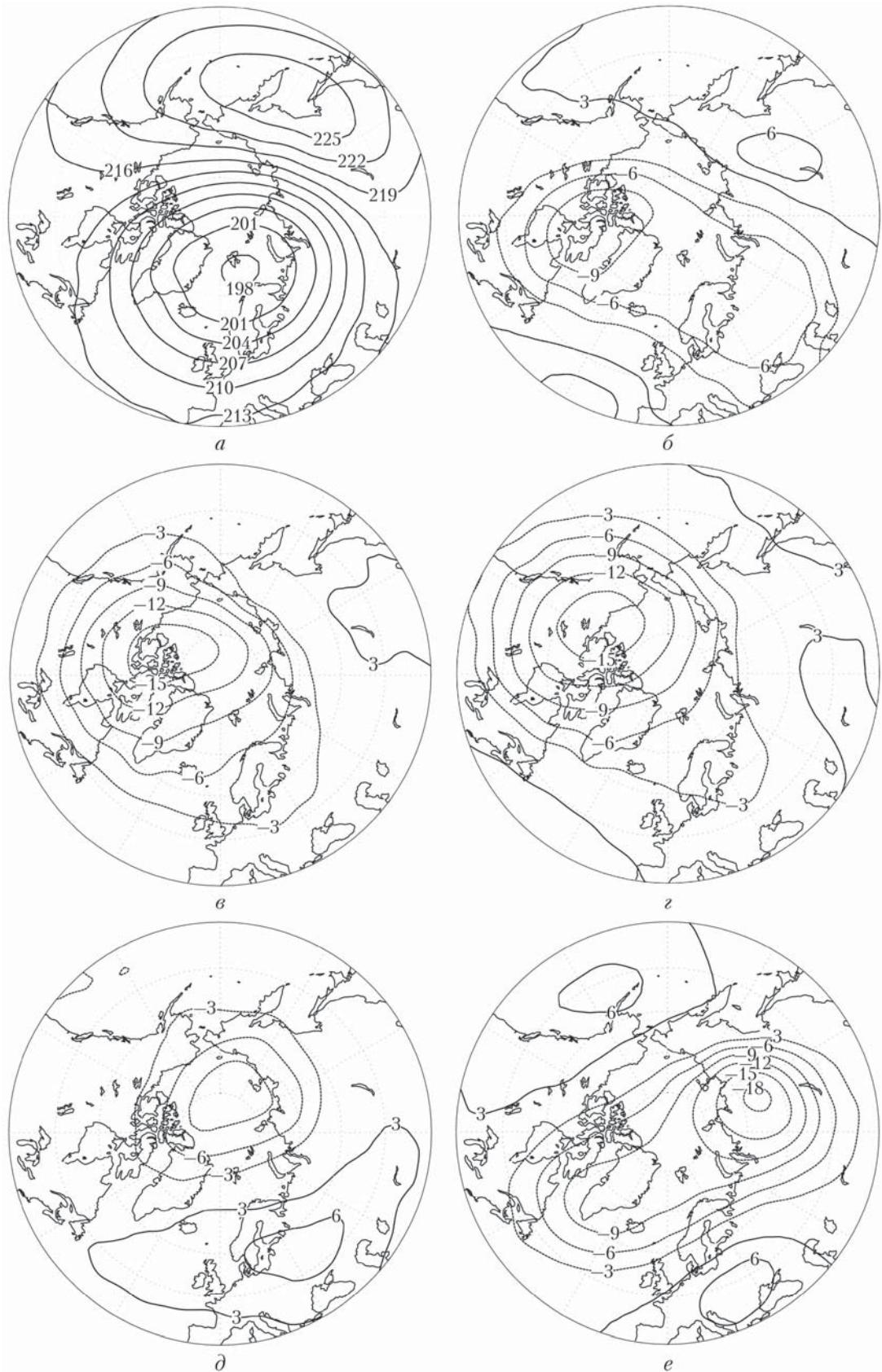


Рис. 6. Климатические (средние в 1981–2010 гг.) среднемесячные значения температуры (К) в январе на изобарической поверхности 30 гПа (а) и аномалии температуры от климатических значений на том же уровне в январе 1996 (б), 2000 (в), 2005 (г), 2011 (д) и 2016 г. (е)

Аномально низкие уровни общего содержания озона над севером Урала и Сибири в конце января 2016 г.

(отсутствии главных ВСП) и позднем наступлении финального ВСП (как это было, например, в апреле 1997 г. и 2011 г.), отрицательные озоновые аномалии над Арктикой могут установить новые «рекорды».

Заключение

В конце января 2016 г. над севером Урала и Сибири наблюдалась первая в истории наблюдений озоновая «мини-дыра» в начале года.

Появление озоновой «мини-дыры» произошло в период существования необычайно сильного и холодного циркумполярного вихря в стратосфере Арктики и вызвано в первую очередь динамическими факторами; химическое разрушение озона лишь усилило аномалию.

С учетом появления неожиданно сильной озоновой аномалии весной 2011 г., «мини-дыры» в январе 2016 г. и неопределенностей дальнейших изменений температуры полярной стратосферы в будущем в зимне-весенний период над Россией возможно возникновение более крупных озоновых аномалий, чем уже наблюдавшиеся, как по величине уменьшения ОСО, так и по площади и продолжительности.

Таким образом, исследования процессов, ответственных за межгодовую изменчивость стратосферного озонового слоя в зимний период в Арктике, в настоящее время продолжают оставаться актуальными. В этой связи крайне желательно было бы придать им новый импульс, в том числе, для объединения имеющихся возможностей в области мониторинга, анализа данных и численного моделирования Росгидромета, РАН и Высшей школы.

Авторы благодарны работникам отечественных наблюдательных станций Росгидромета, проводящих наблюдения ОСО и метеопараметров атмосферы, а также научным командам Национального космического агентства (NASA) и Национального управления по изучению атмосферы и океана (США), обеспечивающим наблюдения со спутников и информацию о состоянии озонового слоя, и научным командам, готовящим данные реанализа NCEP-R и Era-Interim и представляющим их для открытого доступа. Также авторы выражают особую благодарность Наталии Крамаровой (Natalya Kramarova) и Сьюзан Страхан (Susan Strahan) из NASA за полезные консультации.

1. WMO Ozone Report N 55. Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2014. Geneve: WMO, 2014. URL: <http://www.esrl.noaa.gov/csd/assessments/ozone/2014/>
2. Frith S., Kramarova N., Stolarski R., McPeters D., Bharatia P., Labow G. Recent changes in total column ozone based on the SBUV Version 8.6 merged ozone data set // J. Geophys. Res. 2014. V. 119, N 16. P. 9735–9751.
3. Chehade W., Weber M., Burrows J.P. Total ozone trends and variability during 1979–2012 from merged data sets of various satellites // Atmos. Chem. Phys. 2014. V. 14, N 13. P. 7059–7074.
4. Звягинцев А.М., Варгин П.Н., Пешин С. Изменчивость и тренды общего содержания озона в период 1979–2014 гг. // Оптика атмосф. и океана. 2015. Т. 28, № 9. С. 800–809; Zvyagintsev A.M., Vargin P.N., Pe-

shin S. Total ozone variations and trends during the period 1979–2014 // Atmos. Ocean. Opt. 2015. V. 28, N 6. P. 575–584.

5. Newman P.A., Oman L.D., Douglass A.R., Fleming E.L., Frith S.M., Hurwitz M.M., Kawa S.R., Jackman C.H., Krotkov N.A., Nash E.R., Nielsen J.E., Pawson S., Stolarski R.S., Velders G.J.M. What would have happened to the ozone layer if chlorofluorocarbons (CFCs) had not been regulated? // Atmos. Chem. Phys. 2009. V. 9, N 6. P. 2113–2128.
6. Newman P.A., Nash E.R., Douglass A.R., Nielsen J.E., Stolarski R.S. Estimating when the antarctic ozone hole will recover // Twenty Years of Ozone Decline / C. Zerefos et al. (eds.). Springer Science + Business Media B.V., 2009. P. 191–200. DOI: 10.1007/978-90-481-2469-5_14.
7. Варгин П.Н., Груздев А.Н. Что происходит с озоновым слоем в настоящее время? // Вестн. РАН. 2013. Т. 83, № 4. С. 354–358.
8. Manney G.L., Santee M.L., Rex M., Livesey N.J., Pitts M.C., Veefkind P., Nash E.R., Wohltmann I., Lehmann R., Froidevaux L., Poole L.R., Schoeberl M.R., Hafner D.P., Davies J., Dorokhov V., Gernandt H., Johnson B., Kivi R., Kyrö E., Larsen N., Levelt P.F., Makshitas A., McElroy C.T., Nakajima H., Parron-do M.C., Tarasick D.W., von der Gathen P., Walker K.A., Zinoiev N.S. Unprecedented Arctic ozone loss in 2011 // Nature (Gr. Brit.). 2011. V. 478, N 7370. P. 469–475.
9. Баженов О.Е., Бурлаков В.Д. Аномальное понижение уровня общего содержания озона над Томском и северной территорией России в марте–апреле 2011 г. // Оптика атмосф. и океана. 2011. Т. 24, № 10. С. 915–919.
10. Hurwitz M.M., Newman P.A., Garfinkel C.I. The Arctic vortex in March 2011: A dynamical perspective // Atmos. Chem. Phys. 2011. V. 11, N 23. P. 11447–11453.
11. Strahan S.E., Douglass A.R., Newman P.A. The contributions of chemistry and transport to low arctic ozone in March 2011 derived from Aura MLS observations // J. Geophys. Res. D. 2013. V. 118, N 3. P. 1563–1576.
12. Звягинцев А.М., Кузнецов Г.И., Кузнецова И.Н. Весенние аномалии озонового слоя над Россией // Метеорол. и гидрол. 2013. № 5. С. 5–13.
13. Озоновая аномалия над севером Урала и Сибири. URL: <http://www.meteorf.ru/press/news/11045/>
14. Гущин Г.П. Оптические методы и приборы для измерения атмосферного озона и оценка погрешности измерений // Атмосферный озон. Л.: Гидрометеоиздат, 1987. С. 22–36.
15. Bojkov R.D., Balis D.S. Characteristics of episodes with extremely low ozone values in the northern middle latitudes 1957–2000 // Ann. Geophys. 2001. V. 19, N 7. P. 797–807.
16. Большая Российская Энциклопедия. Т. 23. М.: БРЭ, 2013. 768 с.
17. Solomon S. Stratospheric ozone depletion: A review of concepts and history // Rev. Geophys. 1999. V. 37, N 3. P. 275–316.
18. Balis D.S. An update on the dynamically induced episodes of extreme low ozone values over the northern middle latitudes // Int. J. Remote Sens. 2011. V. 32, N 24. P. 9197–9205.
19. Solomon S., Portman R.W., Thompson D.W.J. Contrasts between Antarctic and Arctic ozone depletion // Proc. Nat. Acad. Sci. USA (PNAS). 2007. V. 104, N 2. P. 445–449.
20. Solomon S., Haskins J., Ivy D.J., Min F. Fundamental differences between Arctic and Antarctic ozone depletion // Proc. Nat. Acad. Sci. USA (PNAS). 2014. V. 111, N 17. P. 6220–6225.

21. Peters D., Egger J., Entzian G. Dynamical aspects of ozone mini-hole formation // Meteorol. Atmos. Phys. 1995. V. 55, N 3–4. P. 205–214.
22. James P.M., Peters D. The Lagrangian structure of ozone mini-holes and potential vorticity anomalies in the Northern Hemisphere // Ann. Geophys. 2002. V. 20, N 6. P. 835–846.
23. Лукьянова Н.Ф., Людчик А.М. Статистика аномальных явлений в озонасфере над Европой // Метеорол. и гидрол. 2008. № 8. С. 37–48.
24. Hommel R., Eichmann K.-U., Aschmann J., Bramstedt K., Weber M., von Savigny C., Richter A., Rozanov A., Witrock F., Khosrawi F., Bauer R., Burrows J.P. Chemical ozone loss and ozone mini-hole event during the Arctic winter 2010/2011 as observed by SCIAMA-CHY and GOME-2 // Atmos. Chem. Phys. 2014. V. 14, N 7. P. 3247–3276.
25. Божков Р.Д., Фиолетов В.Э., Кацыгрова Т.В., Ромашкина К.И., Шаламянский А.М. Оценка уменьшения озона над Европой в 1973–1995 гг. на основе откорректированных данных наблюдений фильтровых озонометров // Метеорол. и гидрол. 1995. № 9. С. 30–40.
26. Тарасенко Д.А. Структура и циркуляция стратосферы и мезосферы северного полушария. Л.: Гидрометеоиздат, 1988. 287 с.
27. Climate Prediction Center – Stratosphere Home. URL: <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/stratosphere/>
28. NOAA Earth System Research Laboratory. URL: <http://www.esrl.noaa.gov/>
29. University of Wyoming – Upperair Air Data. URL: <http://weather.uwyo.edu/upperair/>
30. Петров С.П., Хргиан А.Х. Современные проблемы атмосферного озона. Л.: Гидрометеоиздат, 1980. 288 с.
31. Schwartz M.J., Manney G.L., Hegglin M.I., Livesey N.J., Santee M.L., Daffer W.H. Climatology and variability of trace gases in extratropical double-tropopause regions from MLS, HIRDLS, and ACE-FTS measurements // J. Geophys. Res. D. 2015. V. 120, N 2. P. 843–867.
32. Global Atmosphere Watch Newsletter. N 4, March 2016. URL: <http://www.wmo.int/pages/prog/arep/gaw/>
33. Lukyanov A., Nakane H., Yushkov V. Lagrangian estimation of ozone loss in the core and edge region of the arctic polar vortex 1995/1996: Model results and observations // J. Atmos. Chem. 2003. V. 44, N 2. P. 191–210.
34. Holton J.R., Tan H.-C. The quasi-biennial oscillation in the Northern Hemisphere lower stratosphere // J. Meteorol. Soc. Jap. 1982. V. 60, N 1. P. 140–148.
35. WMO Arctic ozone bulletin. 2016. N 1. URL: <https://www.wmo.int/pages/prog/arep/WMOArcticOzoneBulletins2016.html>
36. Thompson D.W.J., Seidel D.J., Randel W.J., Zou C.-Z., Butler A.H., Mears C., Osso A., Long C., Lin R. The mystery of recent stratospheric temperature trends // Nature (Gr. Brit.). 2012. V. 491, N 7426. P. 692–697.
37. Ayarzagüena B., Langematz U., Meul S., Oberländer S., Abalichin J., Kubin A. The role of climate change and ozone recovery for the future timing of major stratospheric warmings // Geophys. Res. Lett. 2013. V. 40, N 10. P. 2460–2465.
38. Langematz U., Meul S., Grunow K., Romanovsky E., Oberländer S., Abalichin J., Kubin A. Future Arctic temperature and ozone: The role of stratospheric composition changes // J. Geophys. Res. D. 2014. V. 119, N 5. P. 2092–2112. DOI: 10.1002/2013JD021100.
39. Ivy D., Solomon S., Rieder H. Radiative and dynamical influences on polar stratospheric temperature trends // J. Climate. 2016. V. 29, N 13. P. 4927–4938.
40. Randel W., Smith A., Wu F., Zou C., Qian H. Stratospheric temperature trends over 1979–2015 derived from combined SSU, MLS, and SABER satellite observations // J. Climate. 2016. V. 29, N 13. P. 4843–4859.
41. Seidel D.J., Li J., Mears C., Moradi I., Nash J., Randel W.J., Saunders R., Thompson D.W.J., Zou C.-Z. Stratospheric temperature changes during the satellite era // J. Geophys. Res. D. 2016. V. 121, N 2. P. 664–681.
42. Zhao L., Xu J., Powell A.M., Jiang Z., Wang D. Use of SSU/MSU satellite observations to validate upper atmospheric temperature trends in CMIP5 simulations // Remote Sens. 2016. V. 8, N 13. DOI: 10.3390/rs8010013.
43. Rieder H.E., Polvani L.M. Are recent Arctic ozone losses caused by increasing greenhouse gases? // Geophys. Res. Lett. 2013. V. 40, N 16. P. 4437–4441.

*M.P. Nikiforova, A.M. Zvyagintsev, P.N. Vargin, N.S. Ivanova, A.N. Luk'yanov, I.N. Kuznetsova.
Extremely low total ozone values over the northern Ural and Siberia in the end of January 2016.*

During the last week of January 2016 total ozone values ca. 200 DU was detected over the northern Ural and Siberia. Such phenomena was classified as ozone “mini-hole”. There was the first time during all the monitoring period since 1970 when ozone “mini-hole” formed here in the first half of the year. Possible causes and factors of extremely low ozone values initiation during the winter 2016 in comparison to other Arctic winters with sufficient ozone losses were analyzed. A primary role of dynamic processes in ozone anomaly formation in January 2016 was shown. The assumption was made that the greater negative ozone anomalies are likely to appear over Arctic in future.