

УДК 551.510

СВЯЗЬ ОЗОНОВОЙ “МИНИ-ДЫРЫ” НАД СИБИРЬЮ В ЯНВАРЕ 2016 г. С АТМОСФЕРНЫМ БЛОКИРОВАНИЕМ

© 2021 г. С. А. Ситнов^{1,*}, академик РАН И. И. Мохов^{1,2}

Поступило 27.04.2021 г.

После доработки 24.05.2021 г.

Принято к публикации 25.05.2021 г.

С использованием спутниковых данных и данных реанализа исследованы характеристики и механизмы формирования озоновой “мини-дыры” в атмосфере над Сибирью зимой 2015/2016 гг. Установлена связь региональной отрицательной аномалии общего содержания озона (ОСО), достигавшей –140 единиц Добсона, с атмосферным блокированием. Аномалия ОСО была обусловлена главным образом уменьшением содержания озона в нижней стратосфере, достигавшим 50% вблизи уровня 70 гПа. При ключевом вкладе атмосферных динамических процессов в формирование озоновой “мини-дыры” отмечена возможность вклада разрушения озона в гетерогенных реакциях на поверхности полярных стратосферных облаков вследствие сильного понижения температуры в стратосфере над областью блокирования.

Ключевые слова: атмосферный озон, аномалия, “мини-дыра”, атмосферное блокирование, Сибирь, зима 2015/2016 гг.

DOI: 10.31857/S2686739721090176

ВВЕДЕНИЕ

Озоновой “мини-дырой” (ОМД) принято называть глубокую нестационарную аномалию синоптического масштаба в поле общего содержания озона (ОСО). ОМД проявляется в средних и высоких широтах, причем чаще зимой, чем летом и чаще в Северном полушарии, чем в Южном [1]. В отличие от антарктической озоновой “дыры”, образование ОМД обусловлено главным образом динамическими факторами – горизонтальной адвекцией и вертикальными движениями [2–4], однако в ряде работ не исключается вклад процессов химического разрушения озона [4, 5].

Общепринятых критериев определения ОМД нет. В качестве нижних порогов принимаются как абсолютные величины ОСО (обычно 220 единиц Добсона (е.Д.)), так и аномалии ОСО величиной от –50 до –70 е.Д., рассчитанные относительно различных климатологических средних [4].

Формирование ОМД часто связано с блокированием зонального потока в среднеширотной атмосфере. Согласно [6], половина ОМД над Европой проявляется в условиях атмосферных блоки-

рований, при этом связанные с блокинками ОМД отличаются наибольшей глубиной и устойчивостью. В связи с глобальным потеплением, на фоне увеличения вероятности более длительных атмосферных блокирований [7, 8], в Евро-Атлантическом секторе ожидается учащение зимних ОМД [6].

Целью данной работы является анализ характеристик и механизмов формирования озоновой “мини-дыры” на примере отрицательной аномалии ОСО, отмечавшейся над Сибирью зимой 2015/2016 гг., в том числе ее связи с атмосферным блокированием.

ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ

Использовались данные измерений общего содержания и профиля озона спутниковым ИК-зондировщиком AIRS (Atmospheric InfraRed Sounder) платформы Aqua. В алгоритме восстановления озона AIRS используются измерения ИК-радиации в области длин волн 9.3–10.1 мкм и сопутствующие измерения микроволнового радиометра AMSU (Advanced Microwave Sounding Unit), позволяющие восстанавливать атмосферные параметры при облачном покрытии до 80% [9]. Пространственное разрешение данных AIRS/AMSU по измерениям в надири ~ 45 км сканирующая система обеспечивает ежедневное покрытие данными 95% поверхности. Расчетная

¹ Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской академии наук, Москва, Россия

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

*E-mail: sitnov@ifaran.ru

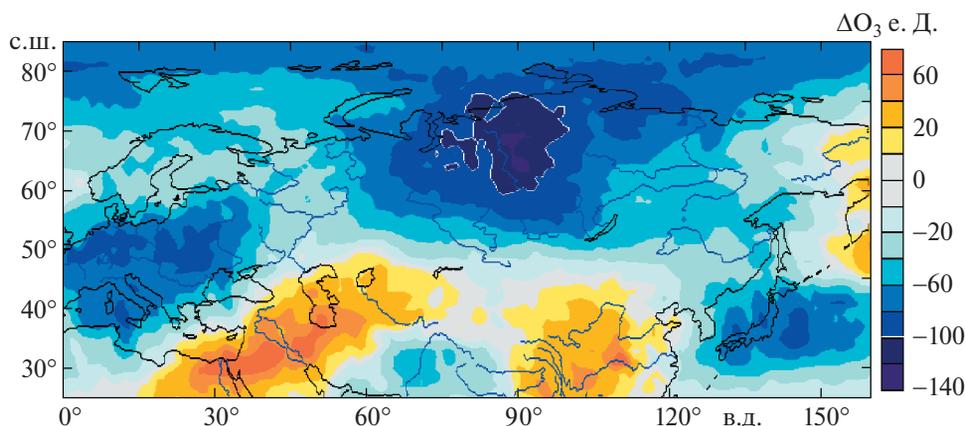


Рис. 1. Пространственное распределение аномалий ОСО над территорией Северной Евразии 26–30 января 2016 г.

точность определения общего содержания озона в атмосфере составляет 20%.

К анализу привлекались также измерения температуры на разных высотах и высоты тропопаузы спектрометром AIRS. Расчетная точность измерений температуры составляет 1 К в слое 1 км [9].

Ежедневные данные дневных измерений ОСО, высоты тропопаузы, а также профилей озона и температуры, доступные на 24 уровнях в атмосфере в диапазоне 1000–1 гПа, на широтно-долготной сетке $1^\circ \times 1^\circ$ (AIRXSTD 006), получены с использованием системы сбора, анализа и визуализации данных Giovanni <https://disc.sci.gsfc.nasa.gov/giovanni>, разработанной и поддерживаемой NASA GES DISC [10].

Для анализа региональных особенностей атмосферной циркуляции, в частности режима блокирования зональной циркуляции в среднеширотной тропосфере, использовались данные NCEP/NCAR реанализа [11]. Среднесуточные данные геопотенциальных высот, а также скорости ветра, доступны на 17 уровнях атмосферы в диапазоне 1000–10 гПа с широтно-долготным разрешением $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ (<https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.ncep.reanalysis>).

МЕТОДЫ АНАЛИЗА

Основой работы являются расчеты аномалий атмосферных параметров. Пространственные распределения аномалий параметра X в период блокирования представлены отклонениями локальных (в разрешении $1^\circ \times 1^\circ$) средних значений X в период 26–30 января 2016 г. от соответствующих средних многолетних значений X для периодов 26–30 января 2003–2015 гг. Ежедневные аномалии рассчитывались как отклонения ежедневных пространственно осредненных величин X в 2016 г. от соответствующих данному дню пространственно осредненных величин X в период 2003–

2015 гг. Высотно-временные распределения аномалий параметра X рассчитывались отдельно на каждом из 24 уровней давления как ежедневные отклонения усредненных по области атмосферного блокирования (60° – 75° с.ш., 70° – 100° в.д.) величин X в 2016 г., от соответствующих данному дню усредненных по указанной области многолетних значений X в период 2003–2015 гг.

В качестве индекса блокирования использовался критерий, предложенный в работе [12], основанный на анализе меридиональных градиентов высоты геопотенциальной поверхности 500 гПа ($H500$).

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Зимой 2015/2016 г., в атмосфере над Россией отмечалось существенное уменьшение содержания озона [13]. Согласно результатам анализа данных AIRS, средние пентадные аномалии ОСО в разрешении $1^\circ \times 1^\circ$ над севером Сибири в конце января 2016 г. достигали -140 е.д. (-40% от соответствующего локального многолетнего среднего значения), при этом площадь с отрицательными аномалиями ОСО не менее -100 е.д. превышала 1 млн км² (рис. 1). Размер, глубина и продолжительность озоновой аномалии свидетельствуют о формировании в атмосфере над Сибирью в январе 2016 г. озоновой “мини-дыры”.

Анализ топографии поверхности геопотенциальных высот на уровне 500 гПа ($H500$) свидетельствует об атмосферном блокировании над Сибирью во второй половине января–начале февраля 2016 г. Пространственное распределение $H500$ в конце января характеризовалось обширной малоподвижной областью высокого давления с максимумом вблизи 60° с.ш., 80° в.д. (значения $H500$ в центре которой превышали 5500 гпм) и двумя сопредельными областями низкого давления западнее и восточнее (рис. 2а). Подобные

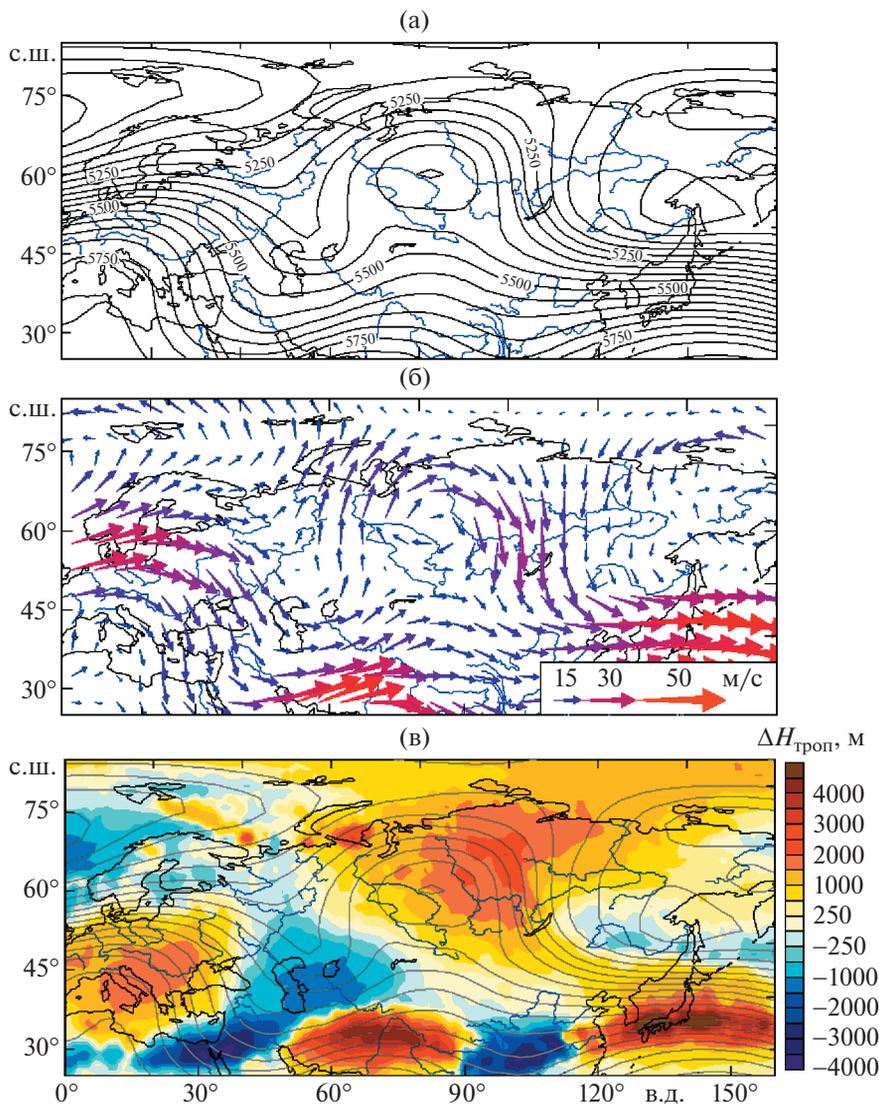


Рис. 2. Пространственные распределения над территорией России: H_{500} [гпм] (а), векторов ветра V_{500} на уровне 500 гПа [м/с] (б) и аномалий высоты тропопаузы $\Delta H_{\text{троп}}$ [м] (в) 26–30 января 2016 г.

особенности H_{500} характерны для атмосферного блокирования триплетного типа – омега-блокирования.

В рамках работы была исследована роль процессов атмосферной динамики в формировании озоновой “мини-дыры”. С атмосферным блокированием связаны интенсификация и стационарирование планетарных волн типа волн Россби [14]. При этом с гребнями волн (отклонениями воздушного потока к северу) связаны восходящие движения воздуха, а с ложбинами – нисходящие [15]. Нисходящие движения в толще атмосферы способствуют увеличению ОСО, а восходящие – его уменьшению [16]. Формированию отрицательной аномалии ОСО в области блокирования могли способствовать восходящие движения воз-

духа в гребне волны над северной периферией блокирующего антициклона (ср. рис. 1 с рис. 2а).

Анализ атмосферной циркуляции свидетельствует, что воздушный поток при приближении к антициклонической области блокирования отклонялся к северу, огибал ее и далее отклонялся к югу (рис. 2б). По многолетним данным максимум ОСО над северными сибирскими регионами в зимний период отмечается вблизи 75° с.ш. [16]. Перенос воздуха с юга на север над западной периферией блокирующего антициклона приводит к замещению обогащенного озоном воздуха вблизи зимнего максимума ОСО обедненным озоном субтропическим воздухом. При этом замещение арктического воздуха субтропическим связано с подъемом высоты тропопаузы (рис. 2в), что также способствует уменьшению ОСО.

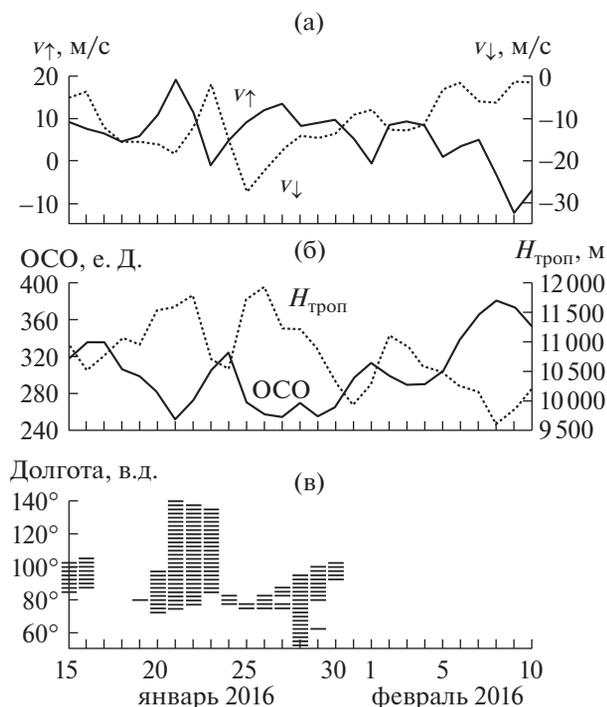


Рис. 3. Межсуточные вариации меридионального ветра над западной периферией области блокирования (50° – 75° с.ш., 60° – 75° в.д., сплошная линия, v_{\uparrow}) и над восточной периферией области блокирования (50° – 75° с.ш., 100° – 115° в.д., пунктирная линия, v_{\downarrow}) (а), а также вариации ОСО (сплошная линия) и высоты тропопаузы (пунктир) над областью блокирования (60° – 75° с.ш., 70° – 100° в.д.) (б) и индекса блокирования над Сибирью (в) в январе-феврале 2016 г.

При доминировании южного ветра в атмосфере на западе области блокирования и северного — на востоке отмечается тесная связь межсуточных вариаций меридионального ветра над западной и восточной перифериями блокирующего антициклона (рис. 3а). Достаточно высокое (по модулю) значение коэффициента корреляции ($r = -0.69$) между вариациями меридиональной компоненты ветра, усредненного по области (50° – 75° с.ш., 60° – 75° в.д.), и вариациями меридиональной компоненты ветра, усредненного по области (50° – 75° с.ш., 100° – 115° в.д.), характеризует общую связность атмосферных потоков в антициклоническом вихре. Усиление антициклонической циркуляции было отмечено в периоды 20–22 января, 25–30 января и 2–4 февраля 2016 г. (рис. 3а).

На рис. 3б показаны межсуточные вариации аномалий ОСО и $H_{\text{троп}}$ в области атмосферного блокирования (60° – 75° с.ш., 70° – 100° в.д.). Корреляционный анализ вариаций свидетельствует о тесной связи аномалий ОСО и $H_{\text{троп}}$ — с коэффициентом корреляции $r = -0.73$. В периоды усиления антициклонической циркуляции в атмосфере

над областью блокирования отмечались уменьшение ОСО и увеличение $H_{\text{троп}}$, (см. рис. 3а и 3б). При этом выявлена статистически значимая антикорреляция аномалий ОСО в атмосфере над областью блокирования с меридиональным ветром над западной периферией блокирующего антициклона в период с 15 января по 10 февраля (с коэффициентом корреляции $r = -0.78$). Согласно полученным результатам, более 60% дисперсии ОСО в рассматриваемый период можно объяснить процессами меридиональной адвекции озона. Анализ долго-временных вариаций индекса блокирования (рис. 3в) свидетельствует о прямой связи отрицательных аномалий ОСО, отмечавшихся в атмосфере над севером Сибири в конце января 2016 г., с интенсивностью процессов блокирования в долготном секторе (60° – 140° в.д.).

Согласно результатам анализа вертикальных профилей максимальная убыль озона над областью блокирования (60° – 75° с.ш., 70° – 100° в.д.) отмечалась в нижней стратосфере (рис. 4а). Локальные минимумы аномалий отношения смеси озона в атмосфере отмечались на уровне 70 гПа 21, 26 и 29 января, а также 4 февраля 2016 г. Наибольшая по абсолютной величине отрицательная аномалия (-1570 ppbv) была достигнута 26 января 2016 г. (-47% относительно многолетнего отношения смеси озона для данного дня и данного уровня в 2003–2015 гг.).

Сравнение вертикальных профилей аномалий озона и температуры в атмосфере свидетельствует о том, что в нижней стратосфере над областью блокирования отрицательные аномалии содержания озона соответствуют сильным отрицательным аномалиям температуры (ср. рис. 4а с рис. 4б). В частности, 30 января 2016 г. аномалия температуры уровне 10 гПа достигала -32°C . Согласно результатам анализа, в нижней стратосфере в период с 15 января по 5 февраля отмечались значения температуры ниже 78°C , а в период с 24 по 30 января 2016 г. — ниже 85°C (рис. 4б). Такие низкие значения температуры способствуют образованию в нижней стратосфере полярных стратосферных облаков (ПСО) I и II типов и интенсивному разрушению озона в гетерогенных реакциях на частицах ПСО [17]. Сопоставление рис. 4а с рис. 4б свидетельствует о том, что наиболее экстремальные отрицательные аномалии отношения смеси озона были отмечены при значениях температуры ниже -85°C в период 25–30 января 2016 г. Вместе с тем следует отметить, что экстремальные отрицательные аномалии отношения смеси озона в стратосфере и ОСО, отмечавшиеся 21 января 2016 г., не сопровождалась экстремально низкими значениями температуры в стратосфере.

В феврале 2016 г. рост температуры в стратосфере (рис. 4б) и сопутствующее увеличение озона

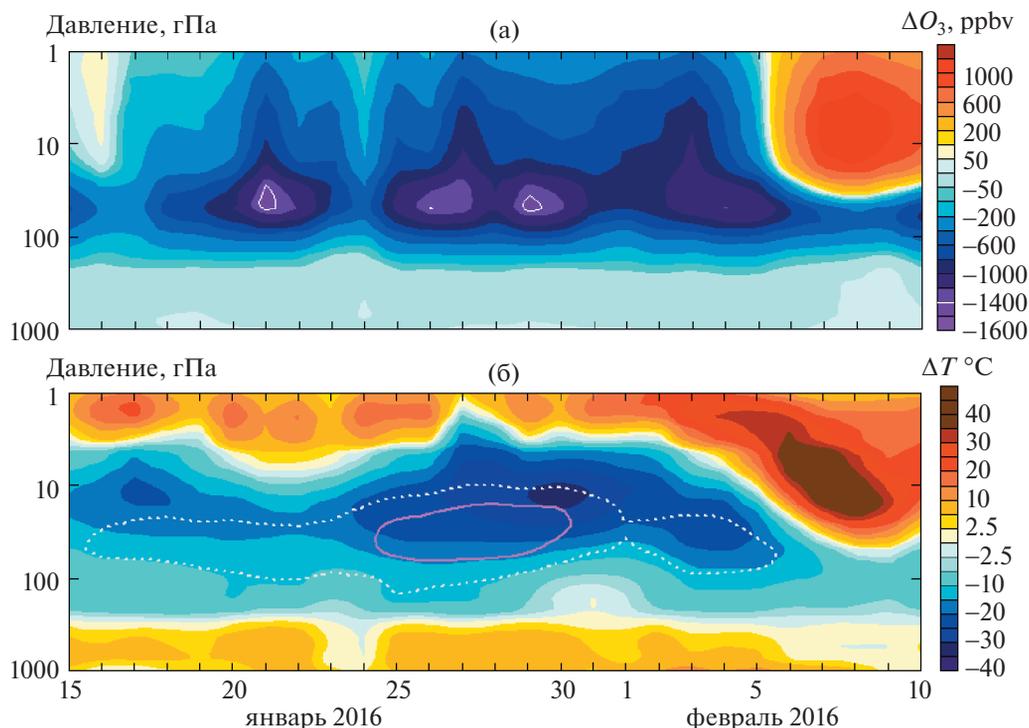


Рис. 4. Высотно-временные разрезы для аномалий отношения смеси озона (а) и аномалий температуры (б) в атмосфере над областью блокирования (60° – 75° с.ш., 70° – 100° в.д.) в январе–феврале 2016 г. Показаны также области значений температуры ниже -78°C (светлая пунктирная линия) и ниже -85°C (фиолетовая сплошная линия).

на (рис. 4а) были обусловлены внезапным стратосферным потеплением, развитие которого (как и озоновая “мини-дыра”) также могло быть следствием влияния атмосферного блокирования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ характеристик и механизмов формирования озоновой “мини-дыры” над Сибирью зимой 2015/2016 г. свидетельствует о связи ОМД с атмосферным блокированием. Уменьшение озона в атмосферном столбе (до 40%) было обусловлено главным образом уменьшением отношения смеси озона в нижней стратосфере. При ключевом вкладе динамических процессов в формирование озоновой “мини-дыры” определенный вклад в разрушение озона могли вносить процессы атмосферной химии вследствие усиления разрушения озона в гетерогенных реакциях на поверхности полярных стратосферных облаков, образовавшихся в связи с сильным понижением температуры в стратосфере над областью блокирования.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 19-17-00240.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. James P.M. A Climatology of Ozone Mini-holes over the Northern Hemisphere // *International Journal of Climatology*. 1998. V. 18. P. 1287–1303.
2. Peters D., Egger J., Entzian G. Dynamical Aspects of Ozone Mini-hole Formation // *Meteorology and Atmospheric Physics*. 1995. V. 55. P. 205–214.
3. Ситнов С.А., Мохов И.И. Формирование озоновой “мини-дыры” в условиях продолжительного блокирующего антициклона в атмосфере над европейской территорией России летом 2010 года // *ДАН*. 2015. Т. 460. № 1. С. 74–78.
4. Ситнов С.А., Мохов И.И. Особенности поля общего содержания озона при атмосферном блокировании над европейской территорией России летом 2010 года (по спутниковым данным) // *Метеорология и гидрология*. 2016. № 1. С. 41–52.
5. Petzold K. The Role of Dynamics in the Total Ozone Deviations from their Long-term Mean over the Northern Hemisphere // *Annales Geophysicae*. 1999. V. 17. P. 231–241.
6. Barriopedro D., Anto M., Garcia J.A. Atmospheric Blocking Signatures in Total Ozone and Ozone Mini-holes // *Journal of Climate*. 2010. V. 23. P. 3967–3983.
7. Мохов И.И., Акперов М.Г., Прокофьева М.А., Тимажеев А.А., Луно А.Р., Ле Трет Э. Блокинг в Северном полушарии и Евро-Атлантическом регионе: оценки изменений по данным реанализа и модельным расчетам // *ДАН*. 2013. Т. 449. № 5. С. 582–586.

8. Мохов И.И., Тимажеев А.В. Атмосферные блокирования и изменения их повторяемости в XXI веке по расчетам с ансамблем климатических моделей // Метеорология и гидрология. 2019. № 6. С. 5–16.
9. Aumann H.H., Chahine M.T., Gautier C., Goldberg M.D., Kalnay E., McMillin L.M., Revercomb H., Rosenkranz P.W., Smith W.L., et al. AIRS/AMSU/HSB on the Aqua Mission: Design, Science Objectives, Data Products, and Processing Systems // IEEE Transactions on Geoscience Remote Sensing. 2003. V. 41. P. 253–264.
10. Acker J.G., Leptoukh G. Online Analysis Enhances Use of NASA Earth Science Data // Eos, Transactions American Geophysical Union. 2007. V. 88. No 2. P. 14–17.
11. Kistler R., Collins W., Saha S., White G., Woollen J., Kalnay E., Chelliah M., Ebisuzaki W., Kanamitsu M., Kousky V., et al. The NCEP-NCAR 50-year Reanalysis: Monthly Means CD-ROM and Documentation // Bulletin of American Meteorological Society. 2001. V. 82. P. 247–268.
12. Tibaldi S., Molteni F. On the Operational Predictability of Blocking // Tellus. 1990. V. 42A. P. 343–365.
13. Никифорова М.П., Варгин П.Н., Звягинцев А.М. Аномалии содержания озона над территорией России в зимне-весенний период 2015/16 гг. // Метеорология и гидрология 2019. № 1. С. 36–49.
14. Мохов И.И. Атмосферные блокинги и связанные с ними климатические аномалии / В сб.: “Нелинейные волны” 2016. Нижний Новгород. ИПФ РАН. 2017. С. 111–124.
15. Matsuno T. Lagrangian Motion of Air Parcels in the Stratosphere in the Presence of Planetary Waves // Pure and Applied Geophysics. 1980. V. 118. P. 189–216.
16. Перов С.П., Хргиан А.Х. Современные проблемы атмосферного озона Л: Гидрометиздат. 1980. 286 с.
17. Solomon S. Stratospheric Ozone Depletion: A Review of Concepts and History // Review of Geophysics. 1999. V. 37. P. 275–316.

RELATIONSHIP OF THE OZONE “MINI-HOLE” OVER SIBERIA IN JANUARY 2016 WITH ATMOSPHERIC BLOCKING

S. A. Sitnov^{a,#} and Academician of the RAS I. I. Mokhov^b

^a A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

^b Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation

[#] E-mail: sitnov@ifaran.ru

Using satellite and reanalysis data, the mechanisms of the formation of the ozone “mini-hole” over Siberia in the winter of 2015/2016 have been investigated. A relationship is established between the regional negative anomaly of the total ozone content (TOC), reaching the value of –140 DU, with atmospheric blocking. The reason for the decrease in TOC was a decrease in the ozone mixing ratio in the lower stratosphere, which reached 50% near the level of 70 hPa. The key contribution of dynamic processes to the formation of the ozone “mini-hole” is shown. Possible contribution of heterogeneous reactions on the surface of polar stratospheric clouds in ozone destruction is also discussed.

Keywords: Atmospheric ozone, anomaly, “mini-hole”, atmospheric blocking, Siberia, 2016