

УДК 551.51

## БЕСПРЕЦЕДЕНТНАЯ ОЗОНОВАЯ АНОМАЛИЯ В АРКТИЧЕСКОЙ СТРАТОСФЕРЕ В ЗИМНЕ-ВЕСЕННИЙ ПЕРИОД 2020 г.

© 2020 г. Член-корреспондент РАН В. В. Зуев<sup>1</sup>, Е. С. Савельева<sup>1,\*</sup>, А. В. Павлинский<sup>1</sup>

Поступило 01.09.2020 г.

После доработки 05.10.2020 г.

Принято к публикации 06.10.2020 г.

Представлен анализ беспрецедентного по продолжительности и интенсивности истощения стратосферного озона над Арктикой, наблюдавшегося с января по апрель 2020 г. Для анализа параметров озоновой аномалии был применен новый метод, позволяющий оценить средние значения температуры и массового отношения смеси озона внутри полярного вихря, а также определить площадь вихря и скорость ветра по границе вихря, с использованием данных нового реанализа ERA5. Применение данного метода весьма оправдано для арктического полярного вихря, характеризующегося значительной изменчивостью. Озоновая аномалия 2020 г. сравнивается с двумя крупнейшими аномалиями в Арктике за период с 1979 по 2019 г., наблюдавшимися в 1997 и 2011 г. Показано, что в 2020 г. в нижней стратосфере над Арктикой наблюдалось аномальное усиление арктического полярного вихря, превысившее предшествующий экстремум, зарегистрированный в 1997 г., на 5 м/с в среднем с января по апрель, а массовое отношение смеси озона в нижней стратосфере достигло беспрецедентно низких значений, на 30% ниже предшествующего экстремума, зарегистрированного в 2011 г. Впервые над Арктикой озоновая аномалия регистрировалась в течение 4 мес.

*Ключевые слова:* арктическая озоновая аномалия, полярный вихрь, полярная стратосфера, геопотенциал, скорость ветра

DOI: 10.31857/S2686739720120130

Истощение стратосферного озона над Арктикой в зимне-весенний период 2020 г. рассмотрено в работах [1, 2]. Оно описано как аномальное атмосферное явление в стратосфере над Арктикой, сопоставимое с антарктическими озоновыми дырами [1]. Согласно данным прибора Microwave Limb Sounder (MLS), установленного на спутнике Ауга, содержание озона в Арктике весной 2020 г. было рекордно низким, причем каталитический цикл разрушения озона начался раньше, чем когда-либо за весь период наблюдений [2].

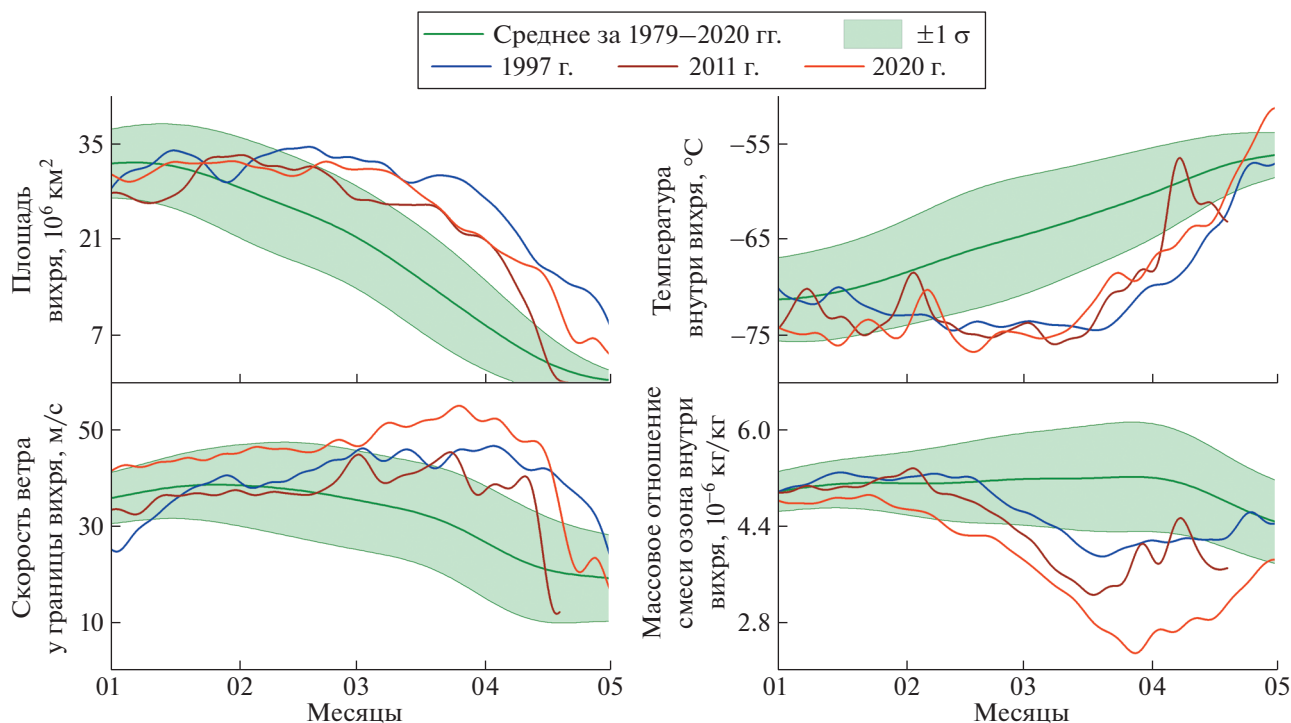
Напомним, что стратосферные полярные вихри представляют собой сезонные крупномасштабные циклоны, существующие с осени по весну [3–5]. Внутри вихря в стратосфере при экстремально низких температурах (ниже  $-78^{\circ}\text{C}$ ) формируются полярные стратосферные облака (ПСО), на поверхности и в объеме которых протекают гетерогенные реакции с высвобождением молекулярного хлора. При появлении солнечного излучения над полярным регионом молекуляр-

ный хлор фотодиссоциирует с образованием радикалов хлора, вступающих в каталитический цикл разрушения озона [6, 7]. При этом степень истощения стратосферного озона над полярной областью зависит от устойчивости полярного вихря в период с конца зимы по весну [8, 9]. Антарктические озоновые аномалии, как правило, формируются ежегодно и устойчиво существуют около четырех месяцев, с августа по ноябрь. В отличие от них, арктические озоновые аномалии образуются в среднем раз в три года и наблюдаются в период с января по апрель продолжительностью от нескольких дней до двух месяцев [9]. Лишь единственный раз за период наблюдений с 1979 по 2020 г. разрушение озона над Арктикой происходило в течение неполных четырех месяцев, с января по апрель 2020 г., что по продолжительности сопоставимо с антарктической озоновой дырой.

Для анализа динамики основных параметров этой озоновой аномалии мы использовали новый метод, позволяющий определить площадь арктического полярного вихря, скорость ветра на границе вихря, среднюю температуру и среднее массовое отношение смеси озона внутри вихря, основываясь на том, что граница арктического полярного вихря в нижней стратосфере на уровне

<sup>1</sup> Институт мониторинга климатических и экологических систем Сибирского отделения Российской академии наук, Томск, Россия

\*E-mail: esav.pv@gmail.com



**Рис. 1.** Временной ход площади арктического полярного вихря, средней скорости ветра у границы полярного вихря, средней температуры внутри полярного вихря и среднего массового отношения смеси озона внутри полярного вихря на уровне 50 гПа с января по апрель 1997, 2011 и 2020 г. на фоне средних значений за 1979–2020 г. со среднеквадратичными отклонениями ( $\pm 1 \sigma$ ).

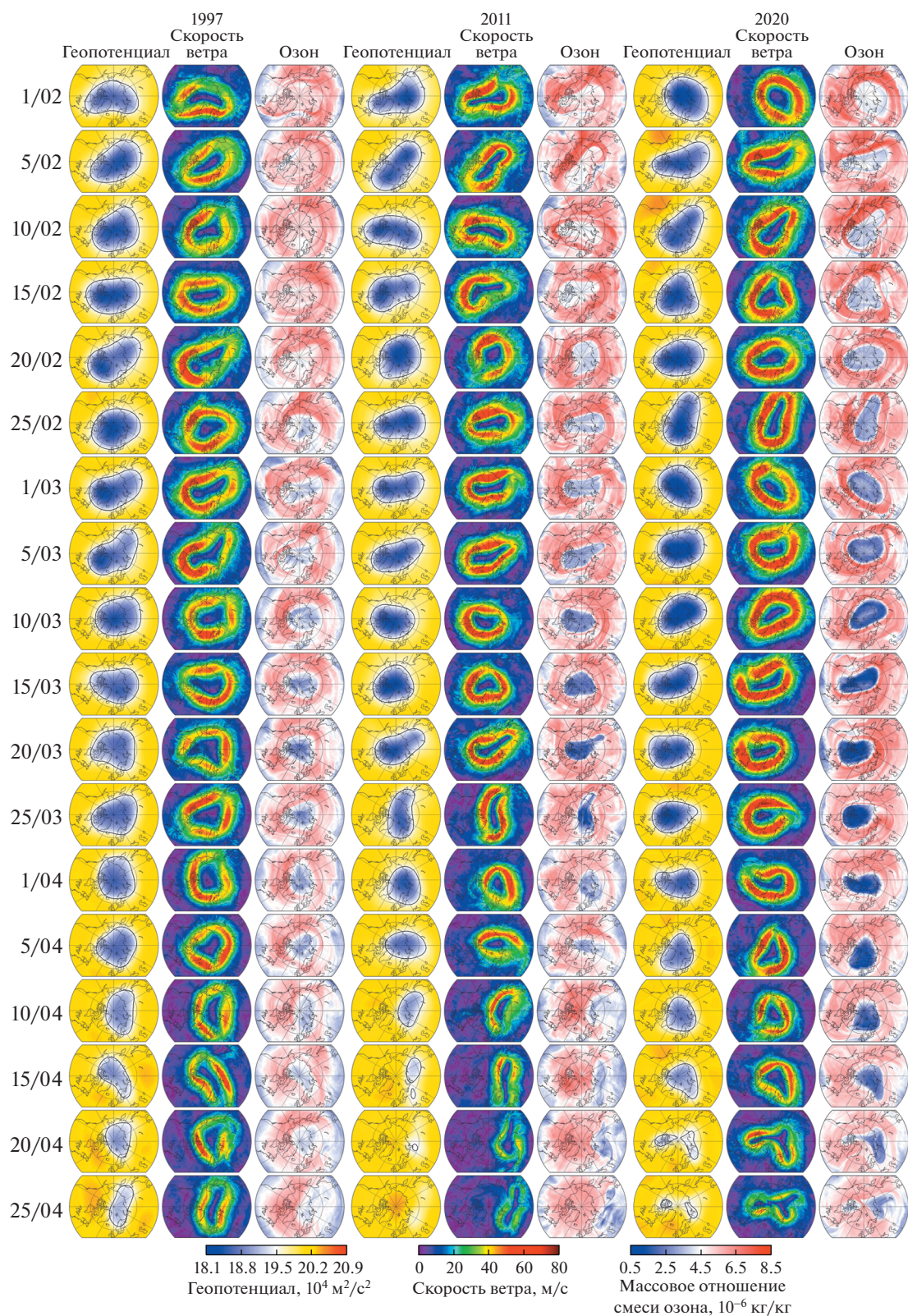
50 гПа ( $\sim 20$  км) определяется значениями геопотенциала  $\sim 19.5 \times 10^4 \text{ м}^2/\text{с}^2$  [10]. Расчеты проводились на этой высоте с января 1979 г. по май 2020 г. (для временных периодов, когда полярный вихрь существовал) с использованием данных реанализа ERA5 [11], являющегося пятым поколением реанализов European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) и отличающегося высоким пространственным и временным разрешением. Скорость ветра определялась как квадратный корень из суммы квадратов значений зонального и меридионального ветра в каждой точке сетки по границе вихря. Поведение исследуемых параметров в зимне-весенний период 2020 г. сравнивалось с 42-летним климатическим средним за 1979–2020 г., а так же динамикой этих параметров в 1997 и 2011 г., когда наблюдались наиболее крупные арктические озонные аномалии за период с 1979 по 2019 г. [12].

Результаты расчетов представлены на рис. 1 и 2. На рис. 1 приведена динамика исследуемых параметров в зимне-весенний период с января по апрель 1997, 2011 и 2020 г. в сравнении с климатическими средними значениями. На рис. 2 изображены поля геопотенциала, скорости ветра и массового отношения смеси озона на уровне 50 гПа над Арктикой с 1 февраля по 25 апреля 1997, 2011 и 2020 г. с шагом  $\sim 5$  дней, по данным реанализа

ERA5. Границы полярного вихря, характеризующиеся значениями геопотенциала  $\sim 19.5 \times 10^4 \text{ м}^2/\text{с}^2$ , выделены на рис. 2 контуром. На рис. 2 видно, что полярные вихри в 1997 и 2020 г. большую часть времени характеризовались значительной симметрией относительно полюса в отличие от вихря 2011 г.

В 2020 г. наблюдалось anomalous усиление полярного вихря в марте, при достаточно высоких скоростях в январе, феврале и апреле. В табл. 1 приведены значения средней скорости ветра у границы полярного вихря на уровне 50 гПа ( $v$ ) за период с января по апрель, а также среднее и максимальное значения за март. В 2020 г. регистрировалась максимальная за 42 года спутниковых наблюдений скорость ветра у границы полярного вихря в марте, а также в среднем за март, и в целом за период с января по апрель (табл. 1). В 1997 и 2011 г. скорость ветра у границы вихря была в целом ниже на 11.2 и 18.6% соответственно. В течение всех трех лет наблюдалось anomalous понижение температуры внутри вихря (рис. 1), способствующее формированию частиц ПСО и последующему протеканию реакций разрушения озона. В табл. 1 приведены значения среднего массового отношения смеси озона внутри вихря на уровне 50 гПа ( $\omega$ ) в среднем за период с января по апрель, а также среднее и минимальное значе-





**Рис. 2.** Поля геопотенциала, скорости ветра и массового отношения смеси озона на уровне 50 гПа над Арктикой для выборочных дат в период с февраля по апрель 1997, 2011 и 2020 г.

**Таблица 1.** Средняя скорость ветра у границы полярного вихря и среднее массовое отношение смеси озона внутри вихря на уровне 50 гПа в 1997, 2011 и 2020 г.

	1997 г.	2011 г.	2020 г.
Скорость ветра $v_{\text{ср./макс.}}$ , м/с			
$v_{\text{ср.}}$ за январь–апрель	39.95	36.62	<b>44.98*</b>
$v_{\text{ср.}}$ за март	44.80	41.60	<b>51.44*</b>
$v_{\text{макс.}}$ за март	48.05	47.30	<b>56.66*</b>
Массовое отношение смеси озона $\omega_{\text{ср./мин.}}$ , $10^{-6}$ кг/кг			
$\omega_{\text{ср.}}$ за январь–апрель	4.69	4.40	<b>3.80**</b>
$\omega_{\text{ср.}}$ за март	4.19	3.68	<b>2.98**</b>
$\omega_{\text{мин.}}$ за март	3.81	3.11	<b>2.18**</b>

Примечание. \*Максимальные значения за период с 1979 по 2020 гг. \*\*Минимальные значения за период с 1979 по 2020 гг.

ния за март. В 2020 г. регистрировались минимальные значения массового отношения смеси озона за весь период наблюдений в Арктике, с абсолютным минимумом, зарегистрированным в марте (табл. 1; рис. 1, 2), который был на 30% ниже предшествующего экстремума, наблюдавшегося в 2011 г. В 1997 г. полярный вихрь характеризовался большей площадью и более высокой скоростью по границе, чем в 2011 г., тем не менее, истощение озона в 2011 г. оказалось более глубоким, чем в 1997 г. (рис. 1, 2; табл. 1). В 2011 г. разрушение полярного вихря произошло в середине апреля, в 2020 г. — наблюдалось во второй половине апреля, а в 1997 г. — только к концу апреля (рис. 1, 2).

Таким образом, в данной работе с использованием нового метода представлены численные оценки скорости ветра по границе полярного вихря и массового отношения смеси озона внутри вихря на уровне 50 гПа, на основе данных реанализа ERA5. Граница арктического полярного вихря в нижней стратосфере определялась значениями геопотенциала  $\sim 19.5 \times 10^4 \text{ м}^2/\text{с}^2$ . Это позволило более точно оконтурить арктические вихри, характеризующиеся большой изменчивостью. Степень истощения озона над полярной областью в значительной степени определяется динамикой стратосферного полярного вихря. Показано, что в 2020 г. в нижней стратосфере над Арктикой наблюдалось аномальное усиление арктического полярного вихря, превысившее предшествующий экстремум, зарегистрированный в 1997 г., на 5 м/с в среднем с января по апрель, а массовое отношение смеси озона в нижней стратосфере достигло беспрецедентно низких значений, на 30% ниже предшествующего экстремума, зарегистрированного в 2011 г. При этом озоновая аномалия 2020 г. по продолжитель-

ности (около четырех месяцев) вплотную приблизилась к антарктическому озоновому дырам.

#### ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследование выполнено в рамках госбюджетной темы № АААА–А17–117013050038–7.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Varotsos C.A., Efstathiou M.N., Christodoulakis J.* The Lesson Learned from the Unprecedented Ozone Hole in the Arctic in 2020; A Novel Nowcasting Tool for Such Extreme Events // *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* 2020. V. 207. P. 105330.
2. *Manney G.L., Livesey N.J., Santee M.L., Froidevaux L., Lambert A., Lawrence Z.D., Millán L.F., Neu J.L., Read W.G., Schwartz M.J., Fuller R.A.* Record-low Arctic Stratospheric Ozone in 2020: MLS Observations of Chemical processes and Comparisons with Previous Extreme Winters // *Geophys. Res. Lett.* 2020. V. 47. № 16. P. e2020GL089063.
3. *Waugh D.W., Randel W.J.* Climatology of Arctic and Antarctic Polar Vortices Using Elliptical Diagnostics // *J. Atmos. Sci.* 1999. V. 56. № 11. P. 1594–1613.
4. *Waugh D.W., Polvani L.M.* Stratospheric Polar Vortices // *The Stratosphere: Dynamics, Transport, and Chemistry.* Geophys. Monogr. Ser. 2010. V. 190. P. 43–57.
5. *Newman P.A.* Chemistry and Dynamics of the Antarctic Ozone Hole // *The Stratosphere: Dynamics, Transport, and Chemistry.* Geophys. Monogr. Ser. 2010. V. 190. P. 157–171.
6. *Solomon S.* Stratospheric Ozone Depletion: A Review of Concepts and History // *Rev. Geophys.* 1999. V. 37. № 3. P. 275–316.
7. *Finlayson-Pitts B.J., Pitts J.N.* Chemistry of the Upper and Lower Atmosphere: Theory, Experiments, and Applications. California: Academic Press, 2000. 969 p.
8. *Newman P.A., Kawa S.R., Nash E.R.* On the Size of the Antarctic Ozone Hole // *Geophys. Res. Lett.* 2004. V. 31. № 21. P. L21104.



9. Zuev V.V., Savelieva E. The Role of the Polar Vortex Strength during Winter in Arctic Ozone Depletion from Late Winter to Spring // *Polar Sci.* 2019. V. 22. P. 100469.
10. Zuev V.V., Savelieva E. Arctic Polar Vortex Dynamics during Winter 2006/2007 // *Polar Sci.* 2020. V. 25. P. 100532.
11. Hersbach H., Bell B., Berrisford P., Hirahara S., Horányi A., Muñoz-Sabater J., Nicolas J., Peubey C., Radu R., Schepers D., Simmons A., Soci C., Abdalla S., Abellan X., Balsamo G., Bechtold P., Biavati G., Bidlot J., Bonavita M., de Chiara G., Dahlgren P., Dee D., Diamantakis M., Dragani R., Flemming J., Forbes R., Fuentes M., Geer A., Haimberger L., Healy S., Hogan R.J., Hólm E., Janisková M., Keeley S., Laloyaux P., Lopez P., Lupu C., Radnoti G., de Rosnay P., Rozum I., Vamborg F., Villaume S., Thépaut J.-N. The ERA5 global reanalysis // *Q. J. Roy. Meteor. Soc.* 2020. V. 146. № 729. P. 1–51.
12. Zuev V.V., Zueva N.E., Savelieva E.S. The Role of the Mt. Merapi Eruption in the 2011 Arctic Ozone Depletion // *Atmos. Environ.* 2017. V. 166. P. 327–333.

## UNPRECEDENTED OZONE DEPLETION IN THE ARCTIC STRATOSPHERE IN THE WINTER-SPRING PERIOD OF 2020

**Corresponding member of the RAS V. V. Zuev<sup>a</sup>, E. S. Savelieva<sup>a,#</sup>, and A. V. Pavlinskiy<sup>a</sup>**

<sup>a</sup> *Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Tomsk, Russia*

<sup>#</sup> *E-mail: esav.pv@gmail.com*

We examined the unprecedented depletion of stratospheric ozone over the Arctic from January to April 2020. To analyze the ozone depletion event, a new method was applied, which makes it possible to estimate the average values of temperature and ozone mass mixing ratio inside the polar vortex and to determine the vortex area and wind speed along the vortex edge, using the data of the new ERA5 reanalysis. The use of this method is highly justified for the Arctic polar vortex, which is characterized by significant variability. In this work, we compare the ozone depletion event in 2020 with the two largest ozone depletion events in the Arctic for the period from 1979 to 2019, observed in 1997 and 2011. We have shown that in 2020, in the lower stratosphere over the Arctic, an unusual strengthening of the Arctic polar vortex was observed, exceeding the previous extreme recorded in 1997 by 5 m/s on average from January to April, and ozone mass mixing ratio in the lower stratosphere reached unprecedented low values, 30% below the previous extreme recorded in 2011. For the first time Arctic ozone depletion was observed within 4 months.

*Keywords:* Arctic ozone depletion, polar vortex, polar stratosphere, geopotential, wind speed