

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ОБРАБОТКИ И ИНТЕРПРЕТАЦИИ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

АНОМАЛЬНО ДЛИТЕЛЬНОЕ ОТСУТСТВИЕ ПОЛЯРНЫХ СТРАТОСФЕРНЫХ ОБЛАКОВ В АРКТИКЕ В СЕРЕДИНЕ ЗИМЫ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

© 2023 г. В. В. Зуев^а, Е. С. Савельева^{а, *}, Е. А. Сидоровский^{а, б}

^аИнститут мониторинга климатических и экологических систем Сибирского отделения РАН, Томск, Россия

^бНациональный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия

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

Поступила в редакцию 13.07.2022 г.

Полярные стратосферные облака (ПСО) играют значительную роль в формировании полярных озоновых аномалий, выступая в качестве “поверхностей” для гетерогенных реакций, протекающих с высвобождением фотохимически активного молекулярного хлора в период с конца зимы по начало весны. Кроме того, в течение зимы на частицах ПСО происходит накопление “резервуаров” хлора, реагентов гетерогенных реакций. В случае разрушения частиц ПСО в середине зимы, процесс накопления соединений хлора прерывается, и в период с конца зимы по весну не наблюдается разрушения озона даже в условиях сильного полярного вихря, в присутствии вновь сформировавшихся ПСО. В работе с использованием метода оконтуривания вихрей исследована динамика арктического полярного вихря зимой 1984/1985, 1998/1999, 2001/2002, 2012/2013 и 2018/2019 гг., как причины аномально длительного отсутствия ПСО в Арктике в середине зимы, когда в январе они существовали в течение не более 5 дней по данным спутниковых наблюдений. Разрушение частиц ПСО в исследуемые годы наблюдалось при ослаблении динамического барьера полярного вихря, вследствие локального уменьшения скорости ветра по границе вихря ниже 20 м/с в нижней стратосфере, которое регистрировалось на протяжении практически всего января. Описанные в работе случаи являются единственными примерами аномального ослабления арктического полярного вихря в середине зимы за период с 1979 по 2022 г.

Ключевые слова: полярные стратосферные облака, арктический полярный вихрь, метод оконтуривания вихрей, скорость ветра по границе вихря

DOI: 10.31857/S0205961423010128, **EDN:** MNNOZF

ВВЕДЕНИЕ

Полярные стратосферные облака (ПСО) представляют собой аэрозольные частицы, формирующиеся внутри стратосферных полярных вихрей в результате абсорбции и кристаллизации при экстремальном понижении температуры в осенне-зимний период (Pitts et al., 2018; Hoyle et al., 2013; Engel et al., 2013). ПСО образуются в результате совместной конденсации паров воды и азотной кислоты на сернокислотном аэрозоле и подразделяются на 2 типа (Алоян и др., 2015; Steiner et al., 2021). ПСО типа II, формирующиеся при температуре ниже -85°C , состоят из водяного льда. ПСО типа I, формирующиеся при температуре ниже -78°C , подразделяются на 2 основных подтипа: Ia и Ib. ПСО Ia состоят в основном из кристаллогидратов азотной кислоты $\text{HNO}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ (или $\text{HNO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), а ПСО Ib представляют собой переохлажденный трехкомпонентный раствор $\text{H}_2\text{SO}_4/\text{HNO}_3/\text{H}_2\text{O}$ (Ebert et al., 2016; Kirner et al., 2011; Molleker et al., 2014).

Стратосферные полярные вихри, формирующиеся над полярными областями в условиях увеличения стратосферного меридионального температурного градиента, представляют собой крупномасштабные циклоны, распространяющиеся от тропопаузы в мезосферу и существующие с осени по весну (Waugh, Randel, 1999; Waugh et al., 2017). Динамика полярных вихрей играет важную роль в вариациях озона и температуры в полярной стратосфере, определяя ее циркуляцию в период существования вихря. Возможность формирования полярной озоновой аномалии и ее глубина зависят от силы и устойчивости полярного вихря в зимне-весенний период (Solomon et al., 1986; Solomon, 1999; Newman et al., 2004). Границы полярного вихря представляют собой динамический барьер, в пределах которого в условиях низких температур (ниже -78°C) формируются ПСО (Gomez-Martin et al., 2021).

В арктической стратосфере в условиях относительно слабого полярного вихря ПСО эпизодиче-

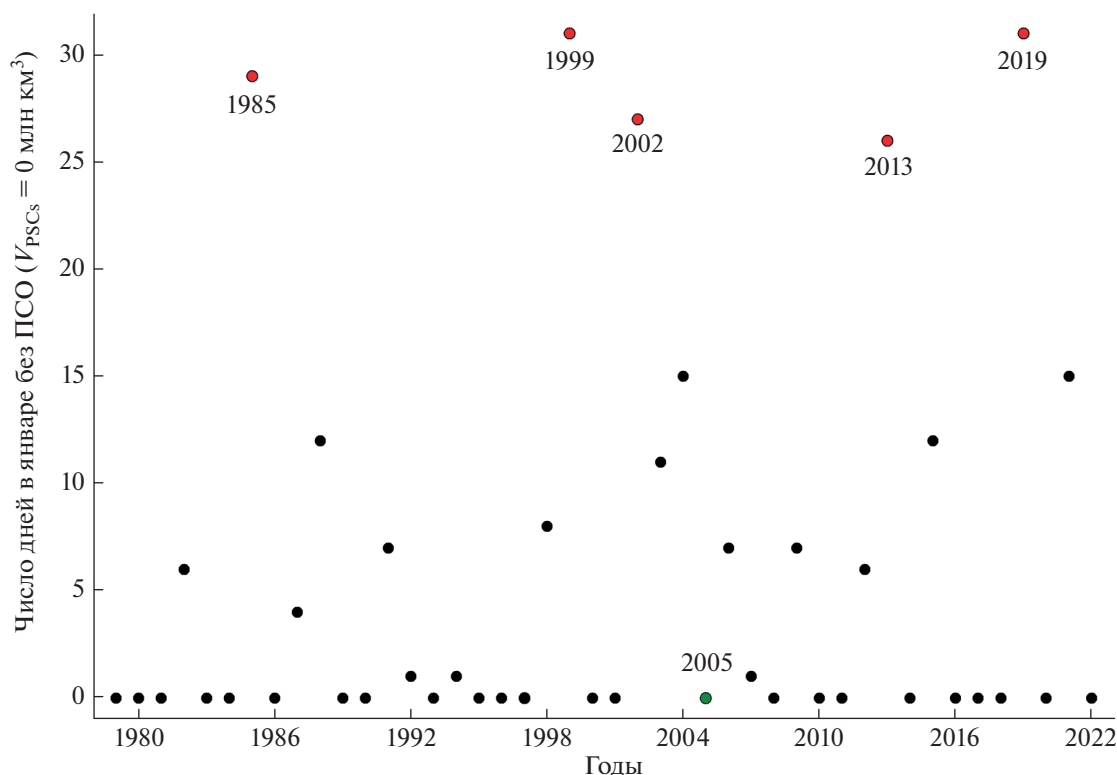


Рис. 1. Длительность отсутствия ПСО в Арктике в январе в период с 1979 по 2022 гг. согласно спутниковым данным NASA GSFC.

ски разрушаются в течение зимы. На рис. 1 приведены данные о продолжительности отсутствия ПСО в Арктике в середине зимы (в январе) согласно спутниковым данным NASA Goddard Space Flight Center (GSFC) в период с 1979 по 2022 гг. За 44 года наблюдений в 24 случаях разрушения ПСО в январе не наблюдалось, в 10 случаях ПСО существовали более 20 дней, в 5 случаях — более 15 дней. При этом аномально длительное отсутствие ПСО в Арктике наблюдалось в январе 1985, 1999, 2002, 2013 и 2019 гг., когда они регистрировались в течение не более 5 дней. На рис. 1 дополнительно выделен 2005 г., который в работе используется для сравнения при анализе динамики арктического полярного вихря в годы с аномально длительным отсутствием ПСО в середине зимы.

ПСО играют ключевую роль в формировании полярных озоновых аномалий (Tritscher et al., 2021). В тонком верхнем слое частиц ПСО протекают гетерогенные реакции взаимодействия устойчивых соединений хлора, хлороводорода HCl и хлорнитрата ClONO₂ (“резервуары” хлора), с высвобождением фотохимически активного молекулярного хлора Cl₂. В конце зимы, с появлением над полярной областью солнечного излучения запускается хлорный цикл разрушения озона (Groß, Müller, 2021; Solomon et al., 2015;

Lawrence et al., 2020). В течение зимы ПСО выступают в качестве “поверхности” для накопления “резервуаров” хлора. Даже кратковременное разрушение частиц ПСО в середине зимы приводит к тому, что процесс накопления соединений хлора на их поверхности начинается заново. Целью данной работы является исследование динамики арктического полярного вихря в 1984/1985, 1998/1999, 2001/2002, 2012/2013 и 2018/2019 гг., как причины аномально длительного отсутствия ПСО в Арктике в середине зимы, когда в январе они существовали в течение не более 5 дней.

ДАННЫЕ И МЕТОДЫ

Среднесуточные данные о площади и объеме ПСО в области 60–90° с.ш. за период с 1979 по 2022 гг. получены по данным Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications, Version 2 (MERRA-2), созданного Goddard Earth Observing System Data Assimilation System (GEOS DAS) на основе спутниковых данных NASA Goddard Space Flight Center (GSFC), <http://ozone-watch.gsfc.nasa.gov>. MERRA-2 — это первый долгосрочный глобальный реанализ, который усваивает данные космических наблюдений за аэрозолями и представляет их взаимодействие с другими физическими процессами в климатической системе

(Gelaro et al., 2017). Среднесуточные данные о скорости зонального и меридионального ветра, геопотенциале, температуре воздуха и массовом отношении смеси озона в области $30\text{--}90^\circ$ с.ш. с горизонтальным разрешением $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ на уровне 50 гПа за период с 1979 по 2019 гг. получены по данным реанализа ERA5 European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (Hersbach et al., 2020), <https://doi.org/10.24381/cds.bd0915c6>.

Для анализа аномальной динамики арктического полярного вихря в 1984/1985, 1998/1999, 2001/2002, 2012/2013 и 2018/2019 гг., а также в 2004/2005 гг. (используя в качестве сравнения) применялся метод оконтуривания вихрей с помощью значений геопотенциала, определяемых по максимальному градиенту температуры и максимальной скорости ветра. Основываясь на том, что граница арктического полярного вихря на уровне 50 гПа определяется значением геопотенциала $19.5 \times 10^4 \text{ м}^2/\text{с}^2$ (Зуев и др., 2021), рассчитывалась скорость ветра у границы вихря, средняя температура и среднее массовое отношение смеси озона внутри вихря. Динамика рассматриваемых параметров в исследуемые годы сравнивалась с 41-летним климатическим средним за 1979–2019 гг., полученным со среднеквадратичными отклонениями (СКО, σ) и сглаженным FFT-фильтром по 15 точкам.

РЕЗУЛЬТАТЫ, ИХ АНАЛИЗ И ОБСУЖДЕНИЕ

Разрушение частиц ПСО в зимний период происходит в результате ослабления динамического барьера полярного вихря в нижней стратосфере, препятствующего проникновению воздушных масс внутрь вихря и способствующего сохранению экстремально низких температур внутри вихря (Manney, Zurek, 1994; Sobel et al., 1997). При локальном уменьшении скорости ветра по границе вихря ниже 20 м/с в течение не менее 3 ч в нижней стратосфере происходит повышение температуры внутри полярного вихря (наблюдающееся даже в центре вихря) до значений более -78°C (Zuev, Savileva, 2020, 2021). В результате наблюдается полное разрушение частиц ПСО внутри вихря (объем ПСО $V_{\text{PSCs}} = 0$ млн км^3), а вскоре после восстановления динамического барьера ПСО начинают снова формироваться. Однако процесс накопления соединений хлора на поверхности ПСО прерывается фактом их разрушения. Для формирования полярной озоновой аномалии необходима устойчивость полярного вихря не только в период с конца зимы по весну (во время протекания реакций разрушения озона в присутствии солнечного излучения), но и в середине зимы, поскольку ПСО должны непрерывно существовать не менее 2-х месяцев до момента начала разрушения озона (Zuev, Savileva, 2019).

За этот минимальный период на их поверхности успевает накопиться достаточное количество соединений хлора для реализации механизма формирования озоновой аномалии. Единственное исключение составляет зимний период 1991/1992 гг., когда ПСО непрерывно существовали всего месяц до формирования озоновой аномалии в январе, однако это связано с извержением вулкана Пинатубо в июне 1991 г., способствовавшим значительному увеличению объема ПСО зимой 1991/1992 гг. (вследствие увеличения концентрации сернокислотного аэрозоля в стратосфере) (Harris et al., 2010; Stenchikov et al., 2002; Rodriguez et al., 1994; Newman et al., 1993; Massoli et al., 2006).

Несмотря на аномальность самого факта ослабления динамического барьера полярного вихря в середине зимы, он, как правило, достаточно быстро восстанавливается (вновь формируются ПСО). В исследуемые годы, очевидно, что полноценного восстановления вихря не произошло, т.к. ПСО в январе существовали не более 5 дней (рис. 1). На рис. 2–4 приведены поля геопотенциала, скорости ветра и температуры на уровне 50 гПа над Арктикой в период с 10 декабря по 1 апреля в исследуемые годы. Поля, отражающие динамику вихря в 2004/2005 гг., приведены для сравнения, поскольку этот год относится к редким случаям в Арктике (1995/1996, 1999/2000, 2004/2005, 2015/2016, 2019/2020, 2021/2022 гг.), когда в зимний период (с декабря по февраль) не наблюдалось ослаблений динамического барьера. Зимой 2004/2005 гг. полярный вихрь был достаточно устойчив, центрирован относительно полюса, характеризовался незначительной изменчивостью (рис. 2–4) и, таким образом, хорошо подходит для сравнения при рассмотрении аномальных случаев. На рис. 2 выделены с помощью линий значения геопотенциала $19.5 \times 10^4 \text{ м}^2/\text{с}^2$, характеризующие границу арктического полярного вихря на уровне 50 гПа, а на рис. 3 выделены значения скорости ветра 20 м/с, характеризующие динамический барьер полярного вихря. На рис. 5 приведена временная динамика среднесуточных значений рассматриваемых параметров, а также объема ПСО и средней концентрации озона внутри вихря в нижней стратосфере в зимний период в исследуемые годы. Рассмотрим динамику арктического полярного вихря отдельно для каждого случая.

1984/1985 гг. Поля геопотенциала, скорости ветра и температуры за 10-е декабря 1984 г. (рис. 2–4) описывают устойчивый вихрь, характеризующийся наличием динамического барьера. Ослабление динамического барьера наблюдалось с 20-го декабря. Поле геопотенциала за 20.12.1984 г. отражает вытягивание вихря (рис. 2), а поле скорости ветра (рис. 3) — ослабление динамического барьера (локально по границе вихря произошло умень-

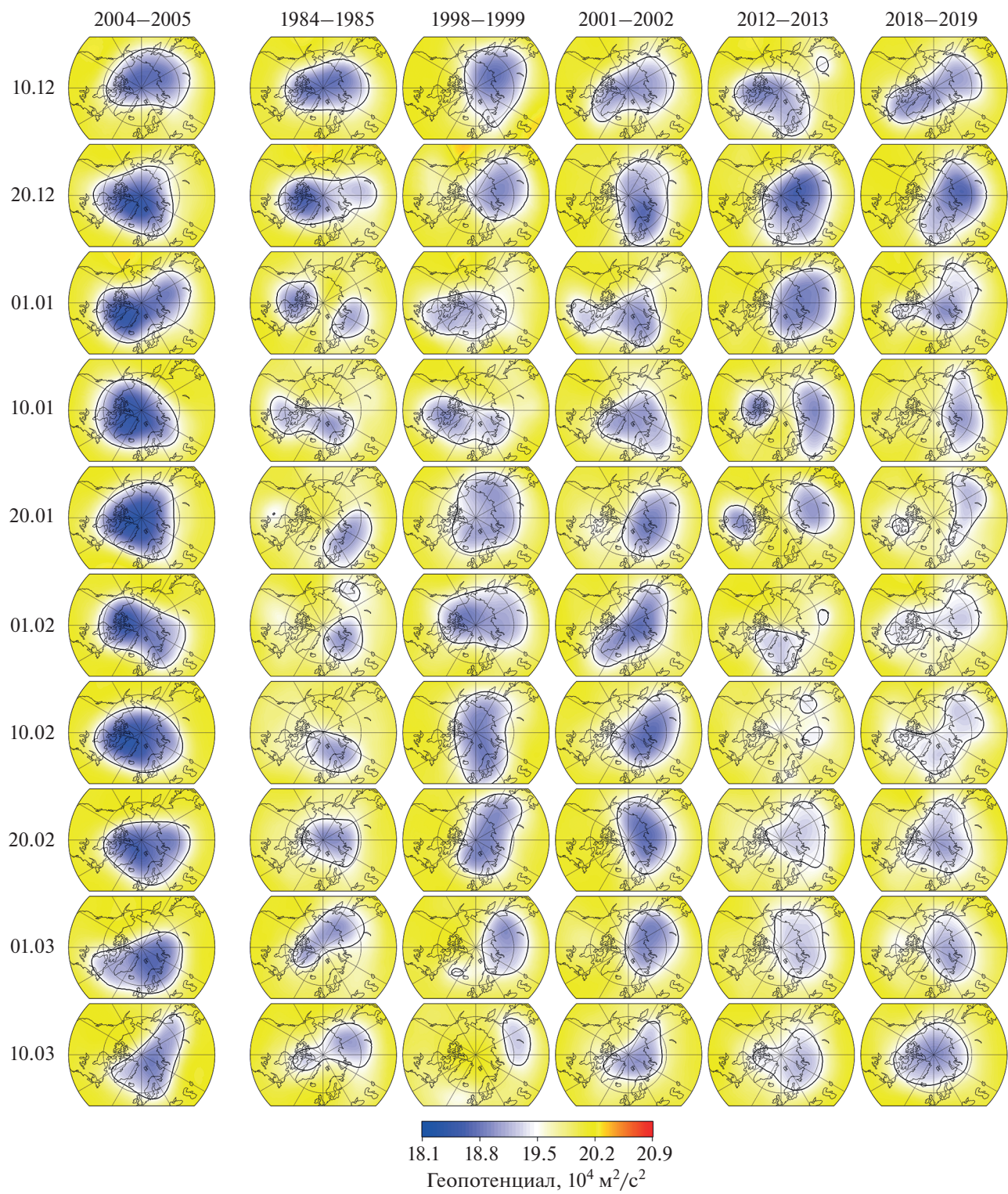


Рис. 2. Поля геопотенциала на уровне 50 гПа над Арктикой в период с 10 декабря по 10 марта 2004/2005, 1984/1985, 1998/1999, 2001/2002, 2012/2013 и 2018/2019 гг.

шение скорости ветра ниже 20 м/с). Площадь ПСО S_{PSCs} 20 декабря на уровне 460 К согласно спутниковым данным NASA GSFC достигла ну-

ля. При расщеплении полярного вихря на два небольших вихря 29го декабря, произошло полное разрушение ПСО: $V_{\text{PSCs}} = 0$ млн км³ с 29.12.1984 г.

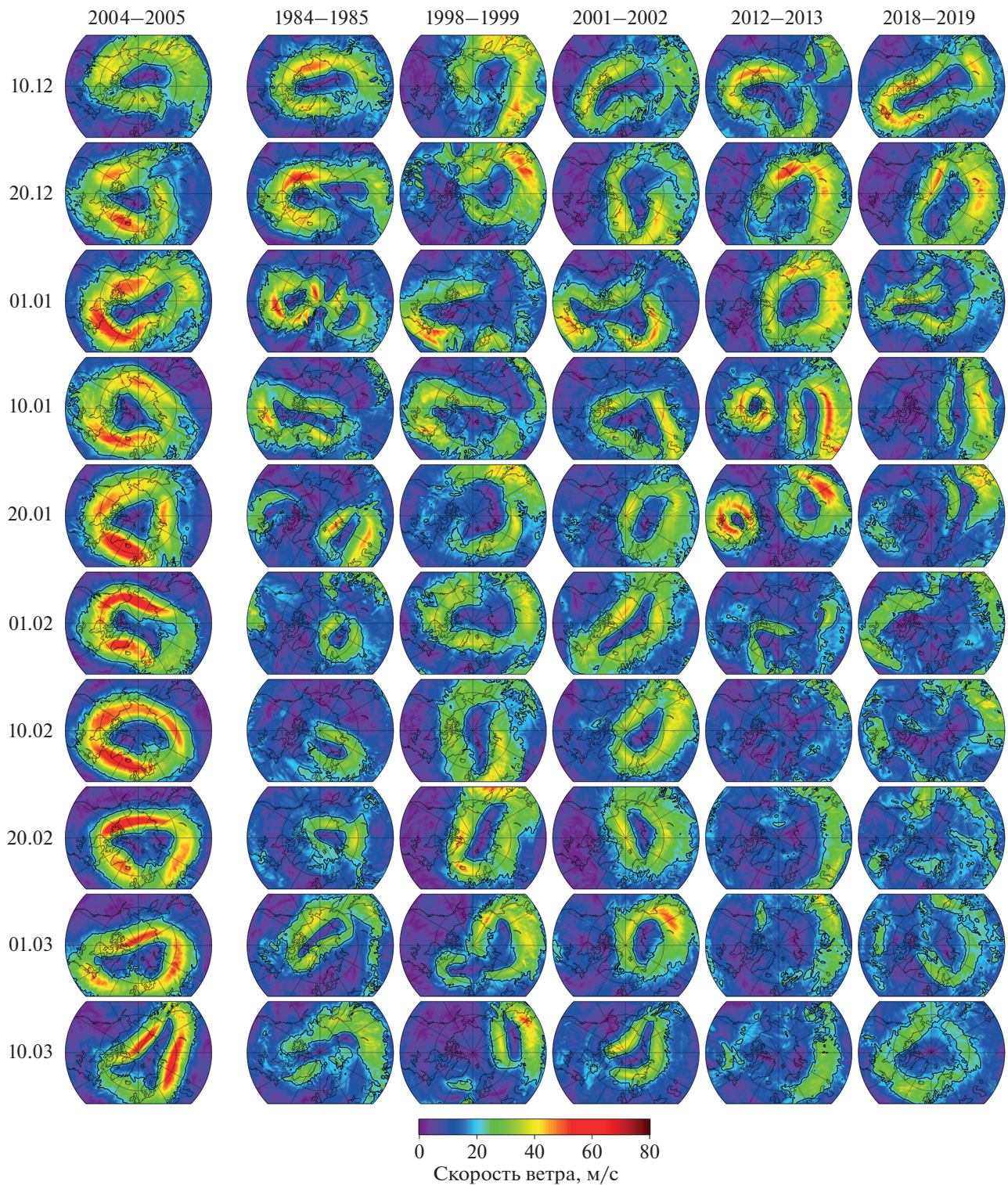


Рис. 3. Поля скорости ветра на уровне 50 гПа над Арктикой в период с 10 декабря по 10 марта 2004/2005, 1984/1985, 1998/1999, 2001/2002, 2012/2013 и 2018/2019 гг.

по 1.01.1985 г. (рис. 5). 4го января начался процесс объединения вихрей, одновременно с ослаблением динамического барьера и разрушением сфор-

мировавшихся ПСО (рис. 5). Вплоть до 4го марта, в течение 2-х месяцев, наблюдался процесс восстановления полярного вихря, постоянно преры-

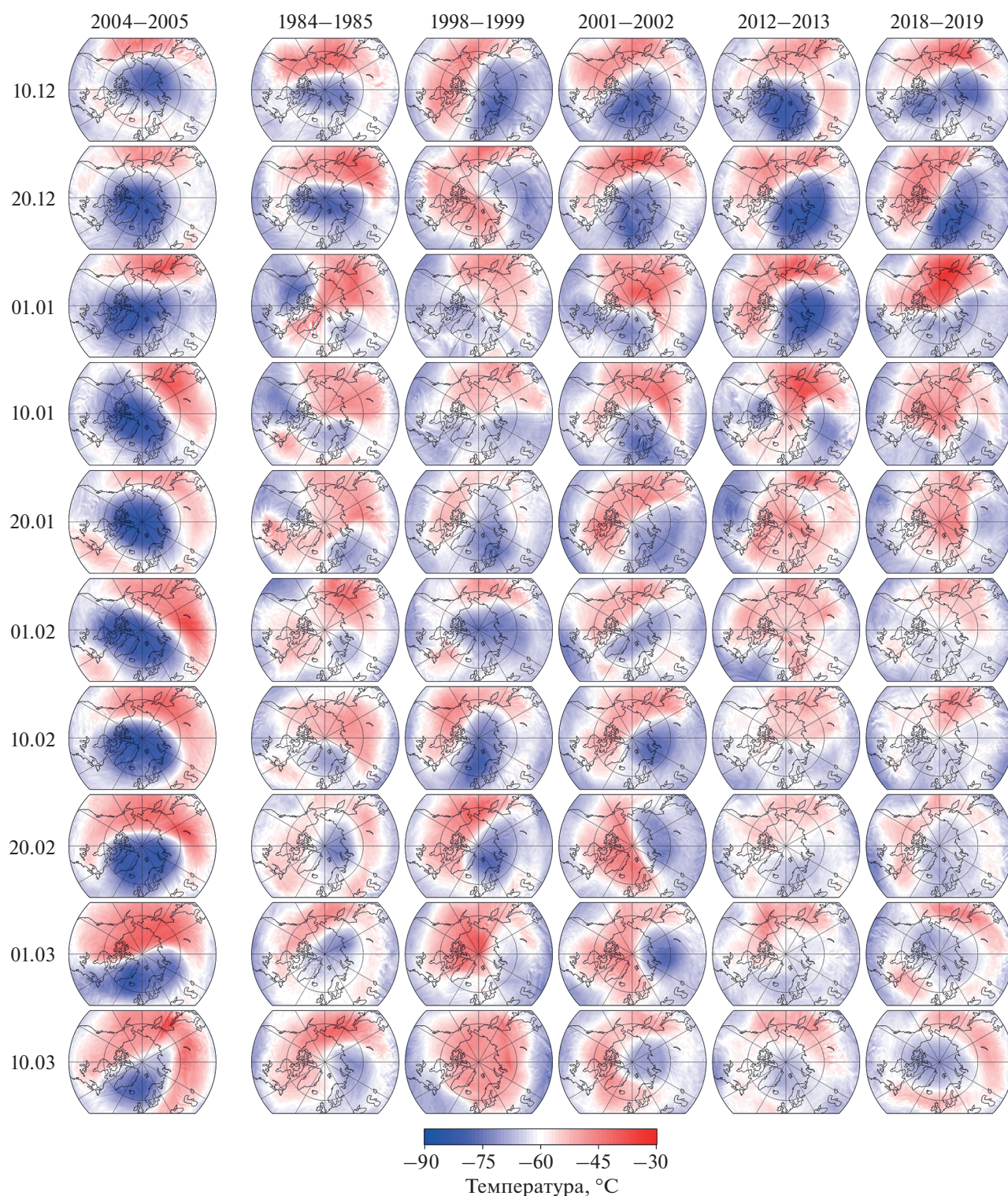


Рис. 4. Поля температуры на уровне 50 гПа над Арктикой в период с 10 декабря по 10 марта 2004/2005, 1984/1985, 1998/1999, 2001/2002, 2012/2013 и 2018/2019 гг.

ваемый его ослаблением (20го января произошло повторное расщепление вихря), ПСО в арктической стратосфере отсутствовали в течение всего

периода (рис. 2–5). К середине марта полярный вихрь разрушился (рис. 2–4). Динамика рассматриваемых параметров на рис. 5 свидетельствует о

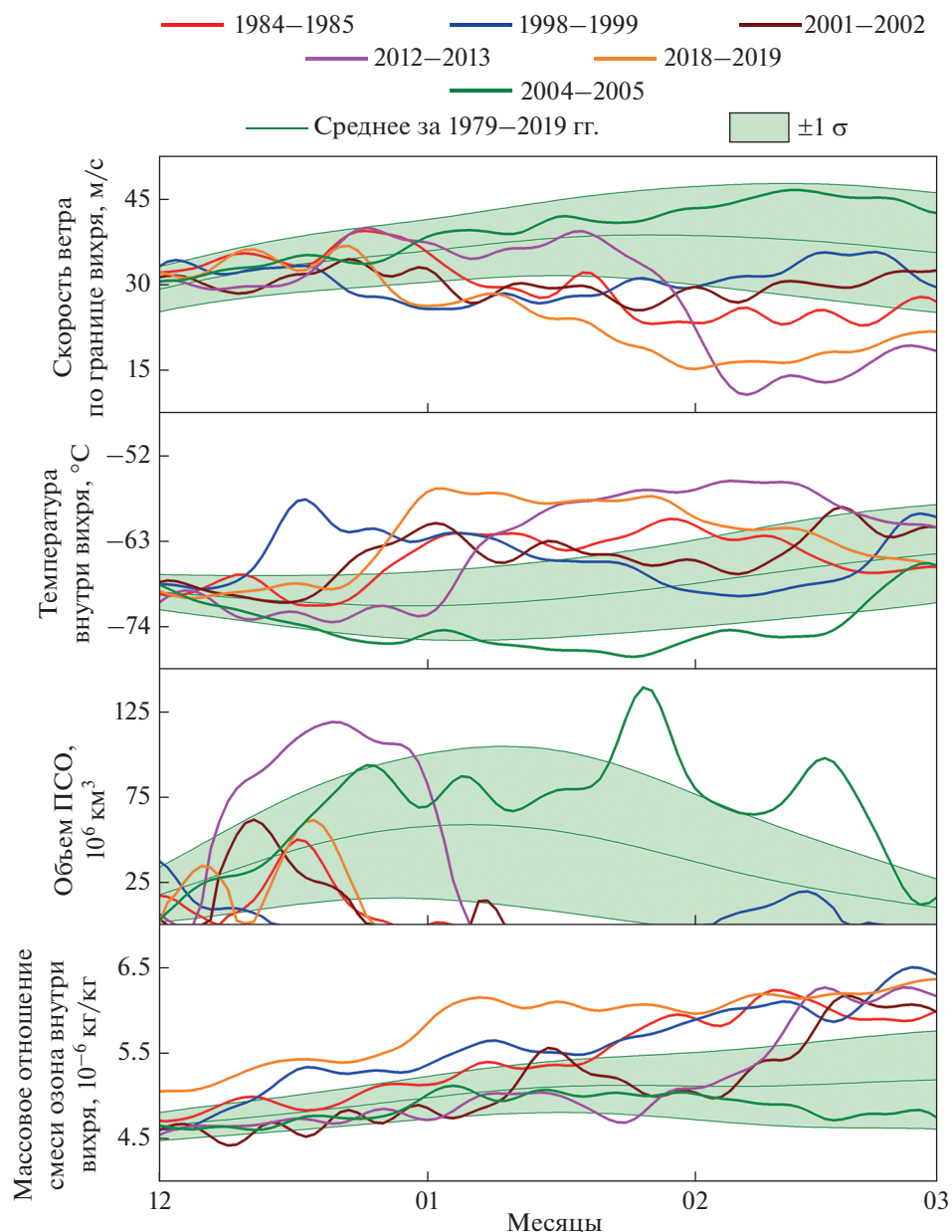


Рис. 5. Временной ход средней скорости ветра по границе арктического полярного вихря, средней температуры и среднего массового отношения смеси озона внутри вихря на уровне 50 гПа, а также объема ПСО в области 60–90° с.ш. с 1 декабря по 1 марта за 2004/2005, 1984/1985, 1998/1999, 2001/2002, 2012/2013 и 2018/2019 гг. на фоне средних значений за 1979–2019 гг. с СКО ($\pm 1 \sigma$).

значительном ослаблении, граничащим с разрушением, полярного вихря начиная с конца декабря по март, до момента его фактического разрушения. ПСО непрерывно отсутствовали в арктической стратосфере с 4го января до начала марта (т.е. почти 2 месяца в зимний период), вследствие постоянного ослабления динамического барьера арктического полярного вихря.

1998/1999 гг. Зимой 1998/1999 гг. ПСО непрерывно отсутствовали в арктической стратосфере с 15 декабря по 2 февраля, т.е. в течение 1.5 мес. в

середине зимы (рис. 5). Динамический барьер на уровне 50 гПа наблюдался только в течение 37 дней за период с декабря по февраль. Во всех случаях, когда динамический барьер на уровне 50 гПа отсутствовал площадь ПСО на уровне 460 К была равна 0 млн км². Расщепление полярного вихря произошло 20 декабря, после чего восстановление динамического барьера вихря наблюдалось лишь 1 февраля, а 3 февраля начали формироваться ПСО (рис. 2–5). В конце февра-

ля произошло повторное расщепление вихря с последующим разрушением в течение 2х недель.

2001/2002 гг. Зимой 2001/2002 гг. ПСО отсутствовали в арктической стратосфере в течение 67 дней (из 90 дней), при этом непрерывно отсутствовали с 10го января по весну (рис. 5). 2го декабря наблюдалось необычно раннее расщепление полярного вихря, в течение следующих 8 дней вихрь частично восстановился, сформировались ПСО. В конце декабря в результате значительного вытягивания вихря произошло ослабление динамического барьера, сопровождавшееся разрушением ПСО. Постоянные ослабления динамического барьера полярного вихря с начала января вплоть до его повторных расщеплений 16 и 24 марта наблюдались вследствие значительно вытягивания вихря.

2012/2013 гг. Первое расщепление полярного вихря зимой 2012/2013 гг. произошло 10 декабря, после которого он восстановился в течение двух дней, сформировались ПСО (рис. 2–4). 6го января наблюдалось вытягивание вихря, протекающее с ослаблением динамического барьера и разрушением ПСО, 8го января произошло повторное расщепление вихря. В расщепленном состоянии вихрь существовал необычно долго, в течение 20 дней, восстановившись только 28 января. В начале февраля наблюдалось очередное расщепление полярного вихря. ПСО, разрушившиеся 6 января, уже не сформировались вплоть до конца весны (рис. 5).

2018/2019 гг. Первое ослабление динамического барьера зимой 2018/2019 гг. произошло 26 декабря и сопровождалось разрушением ПСО (рис. 2–5). Расщепление полярного вихря наблюдалось 3 января, после которого полноценного восстановления вихря уже не произошло. Зимой 2018/2019 гг. ПСО существовали с 1 по 25 декабря, т.е. в течение всего 25 дней из 90.

Во всех пяти рассматриваемых случаях наблюдалось существенное уменьшение скорости ветра по границе вихря в середине зимы, как правило, ниже 30 м/с в нижней стратосфере (рис. 5). Поскольку скорость ветра по границе вихря более 30 м/с в нижней стратосфере является одной из динамических характеристик полярного вихря (Зуев и др., 2022), то одновременно с отмеченным выше уменьшением скорости наблюдалось ослабление динамического барьера. Аномальное повышение температуры внутри вихря в исследуемые годы, одновременно с разрушением ПСО, происходило в условиях ослабления динамического барьера. Отложенным последствием стало отсутствие реакций разрушения озона внутри вихря с конца зимы по весну (с появлением солнечного излучения), даже в тех случаях, когда ПСО сформировались вновь (рис. 5).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе с использованием метода оконтуривания вихрей исследована динамика арктического полярного вихря зимой 1984/1985, 1998/1999, 2001/2002, 2012/2013 и 2018/2019 гг., когда наблюдалось аномально длительное отсутствие ПСО в Арктике в середине зимы (ПСО в эти годы существовали в течение не более 5 дней в январе). ПСО играют ключевую роль в формировании полярных озоновых аномалий, выступая в качестве “поверхности” не только для гетерогенных реакций, протекающих с высвобождением молекулярного хлора в период с конца зимы по начало весны, но и для накопления устойчивых соединений хлора, реагентов гетерогенных реакций. В случае разрушения частиц ПСО в середине зимы, процесс накопления соединений хлора прерывается, что, как правило, приводит к отсутствию озоновой аномалии в период с конца зимы по весну, даже в условиях сильного вихря, в присутствии вновь сформировавшихся ПСО. Разрушение частиц ПСО происходит при ослаблении динамического барьера полярного вихря, вследствие локального уменьшения скорости ветра по границе вихря ниже 20 м/с в нижней стратосфере. В исследуемые годы ослабление динамического барьера наблюдалось на протяжении практически всего января, т.е. в середине зимы, когда арктический полярный вихрь, как правило, наиболее сильный и устойчивый. Кроме того, в исследуемые годы имело место аномально раннее ослабление полярного вихря, эпизодически протекающее с расщеплением, еще в первой половине декабря. Описанные в работе случаи (1984/1985, 1998/1999, 2001/2002, 2012/2013 и 2018/2019 гг.) являются единственными примерами аномального ослабления арктического полярного вихря в середине зимы за период с 1979 по 2022 г.

Ослабление полярного вихря, периодически сопровождающееся его смещением или расщеплением, может происходить вследствие распространения в стратосферу планетарных волн (Brunet, Montgomery, 2002; Montgomery, Brunet, 2002; Polvani, Saravanan, 2000). В свою очередь, осеннее уменьшение площади арктического морского льда способно приводить к усилению вертикально распространяющихся планетарных волн и последующему ослаблению полярного вихря зимой (Mitchell et al., 2012; Screen, 2017). Усиление планетарных волн происходит при повышении приземной температуры в результате сокращения площади морского льда (Jaiser et al., 2013; Kim et al., 2014). В последние десятилетия в условиях климатических изменений наблюдается устойчивое уменьшение площади арктического морского льда (Screen, 2018; Sigmond et al., 2018). Десятилетняя потеря морского льда в зимние месяцы ускорилась с –2.4% за декаду с 1979 по 1999 гг. до

–3.4% за декаду с 2000 по 2018 гг. (Stroeve, Notz, 2018). Растущее уменьшение площади морского льда должно привести к увеличению активности планетарных волн и повышению частоты их проникновения в стратосферу. Однако пока увеличения частоты событий смещения или расщепления арктического полярного вихря не наблюдается (Агеева и др., 2017; Ayarzagüena et al., 2018).

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-27-00002 (<https://rscf.ru/project/22-27-00002/>).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Агеева В.Ю., Груздев А.Н., Елохов А.С., Мохов И.И., Зуева Н.Е. Внезапные стратосферные потепления: статистические характеристики и влияние на общее содержание NO_2 и O_3 // Известия РАН. ФАО. 2017. Т. 53. № 5. С. 545–555.
<https://doi.org/10.7868/S0003351517050014>
- [Ageyeva V.Y., Gruzdev A.N., Elokhov A.S., Mokhov I.I., Zueva N.E. Sudden stratospheric warmings: statistical characteristics and influence on NO_2 and O_3 total contents // *Izv. Atmos. Ocean. Phys.* 2017. V. 53. № 5. P. 477–486.
<https://doi.org/10.7868/S0003351517050014>
- Алоян А.Е., Ермаков А.Н., Арутюнян В.О. Моделирование образования полярных стратосферных облаков с учетом кинетических и гетерогенных процессов // Известия РАН. ФАО. 2015. Т. 51. № 3. С. 276–286.
<https://doi.org/10.7868/S0002351515030025>
- [Aloyan A.E., Yermakov A.N., Arutyunyan V.O. Modeling the formation of polar stratospheric clouds with allowance for kinetic and heterogeneous processes // *Izv. Atmos. Ocean. Phys.* 2015. V. 51. № 3. P. 241–250.
<https://doi.org/10.7868/S0002351515030025>
- Зуев В.В., Савельева Е.С., Павлинский А.В. Анализ динамики арктического полярного вихря во время внезапного стратосферного потепления в январе 2009 г. // Проблемы Арктики и Антарктики. 2021. Т. 67. № 2. С. 134–146. [Zuev V.V., Savelyeva E.S., Pavlinsky A.V. Analysis of the Arctic polar vortex dynamics during the sudden stratospheric warming in January 2009 // *Arctic and Antarctic Research*. 2021. V. 67. № 2. P. 134–146.
<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2021-67-2-134-146>]
- Зуев В.В., Савельева Е.С., Павлинский А.В. Особенности ослабления стратосферного полярного вихря, предшествующие его разрушению // Оптика атмосфер. и океана. 2022. Т. 35. № 1. С. 81–83. [Zuev V.V., Savelyeva E.S., Pavlinsky A.V. Features of stratospheric polar vortex weakening prior to breakdown // *Atmos. Ocean. Opt.* 2022. V. 35. № 2. P. 183–186.
<https://doi.org/10.1134/S1024856022020142>
<https://doi.org/10.15372/AOO20220112>
- Ayarzagüena B., Polvani L.M., Langematz U., Akiyoshi H., Bekki S., Butchart N., Dameris M., Deushi M., Hardiman S.C., Jöckel P., Klekociuk A., Marchand M., Michou M., Morgenstern O., O'Connor F.M., Oman L.D., Plummer D.A., Revell L., Rozanov E., Saint-Martin D., Scinocca J., Stenke A., Stone K., Yamashita Y., Yoshida K., Zeng G. No robust evidence of future changes in major stratospheric sudden warmings: a multi-model assessment from CCM1 // *Atmos. Chem. Phys.* 2018. V. 18. № 15. P. 11277–11287.
<https://doi.org/10.5194/acp-18-11277-2018>
- Brunet G., Montgomery M.T. Vortex Rossby waves on smooth circular vortices: Part I. Theory // *Dynam. Atmos. Oceans*. 2002. V. 35. № 2. P. 153–177.
[https://doi.org/10.1016/S0377-0265\(01\)00087-2](https://doi.org/10.1016/S0377-0265(01)00087-2)
- Ebert M., Weigel R., Kandler K., Günther G., Molleker S., Grooß J.-U., Vogel B., Weinbruch S., Borrmann S. Chemical analysis of refractory stratospheric aerosol particles collected within the arctic vortex and inside polar stratospheric clouds // *Atmos. Chem. Phys.* 2016. V. 16. № 13. P. 8405–8421.
<https://doi.org/10.5194/acp-16-8405-2016>
- Engel I., Luo B.P., Pitts M.C., Poole L.R., Hoyle C.R., Grooß J.-U., Dörnbrack A., Peter T. Heterogeneous formation of polar stratospheric clouds – Part 2: Nucleation of ice on synoptic scales // *Atmos. Chem. Phys.* 2013. V. 13. № 21. P. 10769–10785.
<https://doi.org/10.5194/acp-13-10769-2013>
- Gelaro R., McCarty W., Suárez M.J., Todling R., Molod A., Takacs L., Randles C.A., Darmenov A., Bosilovich M.G., Reichle R., Wang K., Coy L., Cullather R., Draper C., Akella S., Buchard V., Conaty A., da Silva A.M., Gu W., Kim G.-K., Koster R., Lucchesi R., Merkova D., Nielsen J.E., Partyka G., Pawson S., Putman W., Rienecker M., Schubert S.D., Sienkiewicz M., Zhao B. The Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, Version 2 (MERRA-2) // *J. Climate*. 2017. V. 30. № 14. P. 5419–5454.
<https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0758.1>
- Gomez-Martin L., Toledo D., Prados-Roman C., Adame J.A., Ochoa H., Yela M. Polar stratospheric clouds detection at Belgrano II Antarctic station with Visible ground-based spectroscopic measurements // *Remote Sens.* 2021. V. 13. № 8. P. 1412.
<https://doi.org/10.3390/rs13081412>
- Grooß J.-U., Müller R. Simulation of record Arctic stratospheric ozone depletion in 2020 // *J. Geophys. Res. Atmos.* 2021. V. 126. № 12. P. e2020JD033339.
<https://doi.org/10.1029/2020JD033339>
- Harris N.R.P., Lehmann R., Rex M., von der Gathen P. A closer look at Arctic ozone loss and polar stratospheric clouds // *Atmos. Chem. Phys.* 2010. V. 10. № 17. P. 8499–8510.
<https://doi.org/10.5194/acp-10-8499-2010>
- 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.
<https://doi.org/10.1002/qj.3803>
- Hoyle C.R., Engel I., Luo B.P., Pitts M.C., Poole L.R., Grooß J.-U., Peter T. Heterogeneous formation of polar stratospheric clouds – Part 1: Nucleation of nitric acid trihydrate (NAT) // *Atmos. Chem. Phys.* 2013. V. 13. № 18. P. 9577–9595.
<https://doi.org/10.5194/acp-13-9577-2013>
- Jaiser R., Dethloff K., Handorf D. Stratospheric response to Arctic sea ice retreat and associated planetary wave propa-

- gation changes // *Tellus A.* 2013. V. 65. № 1. P. 19375.
<https://doi.org/10.3402/tellusa.v65i0.19375>
- Kim B.-M., Son S.-W., Min S.-K., Jeong J.-H., Kim S.-J., Zhang X., Shim T., Yoon J.H.* Weakening of the stratospheric polar vortex by Arctic sea-ice loss // *Nat. Commun.* 2014. V. 5. P. 4646.
<https://doi.org/10.1038/ncomms5646>
- Kirner O., Ruhnke R., Buchholz-Dietsch J., Jöckel P., Brühl C., Steil B.* Simulation of polar stratospheric clouds in the chemistry-climate-model EMAC via the submodel PSC // *Geosci. Model Dev.* 2011. V. 4. № 1. P. 169–182.
<https://doi.org/10.5194/gmd-4-169-2011>
- Lawrence Z.D., Perlwitz J., Butler A.H., Manney G.L., Newman P.A., Lee S.H., Nash E.R.* The remarkably strong Arctic stratospheric polar vortex of winter 2020: Links to record-breaking Arctic Oscillation and ozone loss // *Geophys. Res. Lett.* 2020. V. 125. № 22. P. e2020JD033271.
<https://doi.org/10.1029/2020JD033271>
- Manney G.L., Zurek R.W.* On the motion of air through the stratospheric polar vortex // *J. Atmos. Sci.* 1994. V. 51. № 20. P. 2973–2994.
[https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1994\)051<2973:OT-MOAT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1994)051<2973:OT-MOAT>2.0.CO;2)
- Massoli P., Maturilli M., Neuber R.* Climatology of Arctic polar stratospheric clouds as measured by lidar in Ny-Ålesund, Spitsbergen (79° N, 12° E) // *J. Geophys. Res. Atmos.* 2006. V. 111. № 9. P. D09206.
<https://doi.org/10.1029/2005JD005840>
- Mitchell D.M., Osprey S.M., Gray L.J., Butchart N., Hardiman S.C., Charlton-Perez A.J., Watson P.* The effect of climate change on the variability of the Northern Hemisphere stratospheric polar vortex // *J. Atmos. Sci.* 2012. V. 69. № 8. P. 2608–3812.
<https://doi.org/10.1175/JAS-D-12-021.1>
- Molleker S., Borrmann S., Schlager H., Luo B., Frey W., Klingebiel M., Weigel R., Ebert M., Mitev V., Matthey R., Woiwode W., Oelhaf H., Dörnbrack A., Stratmann G., Groß J.-U., Günther G., Vogel B., Müller R., Krämer M., Meyer J., Cairo F.* Microphysical properties of synoptic-scale polar stratospheric clouds: in situ measurements of unexpectedly large HNO₃-containing particles in the Arctic vortex // *Atmos. Chem. Phys.* 2014. V. 14. № 19. P. 10785–10801.
<https://doi.org/10.5194/acp-14-10785-2014>
- Montgomery M.T., Brunet G.* Vortex Rossby waves on smooth circular vortices: Part II. Idealized numerical experiments for tropical cyclone and polar vortex interiors // *Dynam. Atmos. Oceans.* 2002. V. 35. № 2. P. 179–204.
[https://doi.org/10.1016/S0377-0265\(01\)00088-4](https://doi.org/10.1016/S0377-0265(01)00088-4)
- Newman P., Lait L.R., Schoeberl M., Nash E.R., Kelly K., Fahey D.W., Nagatani R., Toohey D., Avallone L., Anderson J.* Stratospheric meteorological conditions in the Arctic polar vortex, 1991 to 1992 // *Science.* 1993. V. 261. № 5125. P. 1143–1146.
<https://doi.org/10.1126/science.261.5125.1143>
- 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.
<https://doi.org/10.1029/2004GL020596>
- Pitts M.C., Poole L.R., Gonzalez R.* Polar stratospheric cloud climatology based on CALIPSO spaceborne lidar measurements from 2006 to 2017 // *Atmos. Chem. Phys.* 2018. V. 18. № 15. P. 10881–10913.
<https://doi.org/10.5194/acp-18-10881-2018>
- Polvani L.M., Saravanan R.* The three-dimensional structure of breaking Rossby waves in the polar wintertime stratosphere // *J. Atmos. Sci.* 2000. V. 57. № 21. P. 3663–3685.
[https://doi.org/10.1175/1520-0469\(2000\)057<3663:TTD-SOB>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(2000)057<3663:TTD-SOB>2.0.CO;2)
- Rodriguez J.M., Ko M.K.W., Sze N.D., Heisey C.W., Yue G.K., McCormick M.P.* Ozone response to enhanced heterogeneous processing after the eruption of Mt. Pinatubo // *Geophys. Res. Lett.* 1994. V. 21. № 3. P. 209–212.
<https://doi.org/10.1029/93GL03537>
- Screen J.A.* Simulated atmospheric response to regional and pan-Arctic sea ice loss // *J. Climate.* 2017. V. 30. № 11. P. 3945–3962.
<https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0197.1>
- Screen J.A.* Arctic sea ice at 1.5 and 2°C // *Nat. Clim. Change.* 2018. V. 8. P. 362–363.
<https://doi.org/10.1038/s41558-018-0137-6>
- Sigmond M., Fyfe J.C., Swart N.C.* Ice-free Arctic projections under the Paris Agreement // *Nat. Clim. Change.* 2018. V. 8. P. 404–408.
<https://doi.org/10.1038/s41558-018-0124-y>
- Sobel A.H., Plumb R.A., Waugh D.W.* Methods of calculating transport across the polar vortex edge // *J. Atmos. Sci.* 1997. V. 54. № 18. P. 2241–2260.
[https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1997\)054<2241:MOC-TAT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1997)054<2241:MOC-TAT>2.0.CO;2)
- Solomon S., Garcia R.R., Rowland F.S., Wuebbles D.J.* On the depletion of Antarctic ozone // *Nature.* 1986. V. 321. P. 755–758.
<https://doi.org/10.1038/321755a0>
- Solomon S.* Stratospheric ozone depletion: a review of concepts and history // *Rev. Geophys.* 1999. V. 37. № 3. P. 275–316.
<https://doi.org/10.1029/1999RG900008>
- Solomon S., Kinnison D., Bandoro J., Garcia R.* Simulation of polar ozone depletion: An update // *J. Geophys. Res.* 2015. V. 120. № 15. P. 7958–7974.
<https://doi.org/10.1002/2015JD023365>
- Steiner M., Luo B., Peter T., Pitts M.C., Stenke A.* Evaluation of polar stratospheric clouds in the global chemistry-climate model SOCOLv3.1 by comparison with CALIPSO spaceborne lidar measurements // *Geosci. Model Dev.* 2021. V. 14. № 2. P. 935–959.
<https://doi.org/10.5194/gmd-14-935-2021>
- Stenichkov G., Robock A., Ramaswamy V., Schwarzkopf M.D., Hamilton K., Ramachandran S.* Arctic Oscillation response to the 1991 Mount Pinatubo eruption: Effects of volcanic aerosols and ozone depletion // *J. Geophys. Res.* 2002. V. 107. № 24. P. ACL28.
<https://doi.org/10.1029/2002JD002090>
- Stroeve J., Notz D.* Changing state of Arctic sea ice across all seasons // *Environ. Res. Lett.* 2018. V. 13. № 10. P. 103001.
<https://doi.org/10.1088/1748-9326/aade56>
- Tritscher I., Pitts M.C., Poole L.R., Alexander S.P., Cairo F., Chipperfield M.P., Groß J.-U., Höpfner M., Lambert A., Luo B., Molleker S., Orr A., Salawitch R., Snels M., Spang R., Woiwode W., Peter T.* Polar stratospheric clouds: Satellite observations, processes, and role in ozone depletion // *Rev. Geophys.* 2021. V. 59. № 2. P. e2020RG000702.
<https://doi.org/10.1029/2020RG000702>

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.

[https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1999\)056<1594:COAAP>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1999)056<1594:COAAP>2.0.CO;2)

Waugh D.W., Sobel A.H., Polvani L.M. What is the polar vortex and how does it influence weather? // *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 2017. V. 98. № 1. P. 37–44.

<https://doi.org/10.1175/BAMS-D-15-00212.1>

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.
<https://doi.org/10.1016/j.polar.2019.06.001>

Zuev V.V., Savelieva E. Arctic polar vortex dynamics during winter 2006/2007 // *Polar Sci.* 2020. V. 25. P. 100532.
<https://doi.org/10.1016/j.polar.2020.100532>

Zuev V.V., Savelieva E. Sensitivity of polar stratospheric clouds to the Arctic polar vortex weakening in the lower stratosphere in midwinter // *Proc. SPIE.* 2021. V. 11916. P. 1191674.

<https://doi.org/10.1117/12.2599025>

Abnormally Long Absence of Polar Stratospheric Clouds in the Arctic in Midwinter According to Satellite Observations

V. V. Zuev¹, E. S. Savelieva¹, and E. A. Sidorovsky^{1, 2}

¹*Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Tomsk, Russia*

²*National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia*

Polar stratospheric clouds (PSCs) play a significant role in ozone depletion in the polar regions, acting as “surfaces” for heterogeneous reactions proceeding with the release of photochemically active molecular chlorine from late winter to early spring. Moreover, during the winter, chlorine “reservoirs”, which are reagents for heterogeneous reactions, accumulate on PSC particles. When PSC particles are destroyed in midwinter, the accumulation of chlorine compounds is interrupted, and from late winter to spring, ozone depletion is not observed even under conditions of the strong polar vortex, in the presence of newly formed PSCs. Using the vortex delineation method, we studied the dynamics of the Arctic polar vortex in the winters of 1984/1985, 1998/1999, 2001/2002, 2012/2013 and 2018/2019, as the reasons for the abnormally long absence of PSCs in the Arctic in midwinter, when they existed in January within no more than 5 days according to satellite observations. The PSC melting in these years was observed when the dynamic barrier of the polar vortex weakened due to a local decrease in wind speed along the vortex edge below 20 m/s in the lower stratosphere, which was recorded throughout almost the entire January. The described cases are the only examples of unusual weakening of the Arctic polar vortex in midwinter for the period from 1979 to 2022.

Keywords: polar stratospheric clouds, Arctic polar vortex, vortex delineation method, wind speed along the vortex edge

REFERENCES

Ageyeva V.Y., Gruzdev A.N., Elokhov A.S., Mokhov I.I., Zueva N.E. Sudden stratospheric warmings: statistical characteristics and influence on NO₂ and O₃ total contents // *Izv. Atmos. Ocean. Phys.* 2017. V. 53. № 5. P. 477–486.
<https://doi.org/10.1134/S0001433817050036>

Aloyan A.E., Yermakov A.N., Arutyunyan V.O. Modeling the formation of polar stratospheric clouds with allowance for kinetic and heterogeneous processes // *Izv. Atmos. Ocean. Phys.* 2015. V. 51. № 3. P. 241–250.
<https://doi.org/10.1134/S0001433815030020>

Ayarzagüena B., Polvani L.M., Langematz U., Akiyoshi H., Bekki S., Buchart N., Dameris M., Deushi M., Hardiman S.C., Jöckel P., Klekociuk A., Marchand M., Michou M., Morgenstern O., O'Connor F.M., Oman L.D., Plummer D.A., Revell L., Rozanov E., Saint-Martin D., Scinocca J., Stenke A., Stone K., Yamashita Y., Yoshida K., Zeng G. No robust evidence of future changes in major stratospheric sudden warmings: a multi-model assessment from CCM1 // *Atmos. Chem. Phys.* 2018. V. 18. № 15. P. 11277–11287.
<https://doi.org/10.5194/acp-18-11277-2018>

Brunet G., Montgomery M.T. Vortex Rossby waves on smooth circular vortices: Part I. Theory // *Dynam. Atmos. Oceans.* 2002. V. 35. № 2. P. 153–177.
[https://doi.org/10.1016/S0377-0265\(01\)00087-2](https://doi.org/10.1016/S0377-0265(01)00087-2)

Ebert M., Weigel R., Kandler K., Günther G., Molleker S., Groß J.-U., Vogel B., Weinbruch S., Borrmann S. Chemical analysis of refractory stratospheric aerosol particles collected within the arctic vortex and inside polar stratospheric clouds // *Atmos. Chem. Phys.* 2016. V. 16. № 13. P. 8405–8421.
<https://doi.org/10.5194/acp-16-8405-2016>

Engel I., Luo B.P., Pitts M.C., Poole L.R., Hoyle C.R., Groß J.-U., Dörnbrack A., Peter T. Heterogeneous formation of polar stratospheric clouds — Part 2: Nucleation of ice on synoptic scales // *Atmos. Chem. Phys.* 2013. V. 13. № 21. P. 10769–10785.
<https://doi.org/10.5194/acp-13-10769-2013>

Gelaro R., McCarty W., Suárez M.J., Todling R., Molod A., Takacs L., Randles C.A., Darmenov A., Bosilovich M.G., Reichle R., Wargan K., Coy L., Cullather R., Draper C., Akella S., Buchard V., Conaty A., da Silva A.M., Gu W., Kim G.-K., Koster R., Lucchesi R., Merkova D., Nielsen J.E., Partyka G., Pawson S., Putman W., Rienecker M., Schubert S.D., Sienkiewicz M., Zhao B. The Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, Version 2 (MERRA-2) // *J.*

- Climate. 2017. V. 30. № 14. P. 5419–5454.
<https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0758.1>
- Gomez-Martin L., Toledo D., Prados-Roman C., Adame J.A., Ochoa H., Yela M. Polar stratospheric clouds detection at Belgrano II Antarctic station with Visible ground-based spectroscopic measurements // *Remote Sens.* 2021. V. 13. № 8. P. 1412.
<https://doi.org/10.3390/rs13081412>
- Groß J.-U., Müller R. Simulation of record Arctic stratospheric ozone depletion in 2020 // *J. Geophys. Res. Atmos.* 2021. V. 126, N 12. P. e2020JD033339.
<https://doi.org/10.1029/2020JD033339>
- Harris N.R.P., Lehmann R., Rex M., von der Gathen P. A closer look at Arctic ozone loss and polar stratospheric clouds // *Atmos. Chem. Phys.* 2010. V. 10. № 17. P. 8499–8510.
<https://doi.org/10.5194/acp-10-8499-2010>
- 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.
<https://doi.org/10.1002/qj.3803>
- Hoyle C.R., Engel I., Luo B.P., Pitts M.C., Poole L.R., Groß J.-U., Peter T. Heterogeneous formation of polar stratospheric clouds – Part 1: Nucleation of nitric acid trihydrate (NAT) // *Atmos. Chem. Phys.* 2013. V. 13. № 18. P. 9577–9595.
<https://doi.org/10.5194/acp-13-9577-2013>
- Jaiser R., Dethloff K., Handorf D. Stratospheric response to Arctic sea ice retreat and associated planetary wave propagation changes // *Tellus A.* 2013. V. 65. № 1. P. 19375.
<https://doi.org/10.3402/tellusa.v65i0.19375>
- Kim B.-M., Son S.-W., Min S.-K., Jeong J.-H., Kim S.-J., Zhang X., Shim T., Yoon J.H. Weakening of the stratospheric polar vortex by Arctic sea-ice loss // *Nat. Commun.* 2014. V. 5. P. 4646.
<https://doi.org/10.1038/ncomms5646>
- Kirner O., Ruhnke R., Buchholz-Dietsch J., Jöckel P., Brühl C., Steil B. Simulation of polar stratospheric clouds in the chemistry-climate-model EMAC via the submodel PSC // *Geosci. Model Dev.* 2011. V. 4. № 1. P. 169–182.
<https://doi.org/10.5194/gmd-4-169-2011>
- Lawrence Z.D., Perlwitz J., Butler A.H., Manney G.L., Newman P.A., Lee S.H., Nash E.R. The remarkably strong Arctic stratospheric polar vortex of winter 2020: Links to record-breaking Arctic Oscillation and ozone loss // *Geophys. Res. Lett.* 2020. V. 125. № 22. P. e2020JD033271.
<https://doi.org/10.1029/2020JD033271>
- Manney G.L., Zurek R.W. On the motion of air through the stratospheric polar vortex // *J. Atmos. Sci.* 1994. V. 51. № 20. P. 2973–2994.
[https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1994\)051<2973:OT-MOAT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1994)051<2973:OT-MOAT>2.0.CO;2)
- Massoli P., Maturilli M., Neuber R. Climatology of Arctic polar stratospheric clouds as measured by lidar in Ny-Ålesund, Spitsbergen (79° N, 12° E) // *J. Geophys. Res. Atmos.* 2006. V. 111. № 9. P. D09206.
<https://doi.org/10.1029/2005JD005840>
- Mitchell D.M., Osprey S.M., Gray L.J., Butchart N., Hardiman S.C., Charlton-Perez A.J., Watson P. The effect of climate change on the variability of the Northern Hemisphere stratospheric polar vortex // *J. Atmos. Sci.* 2012. V. 69. № 8. P. 2608–3812.
<https://doi.org/10.1175/JAS-D-12-021.1>
- Molleker S., Borrmann S., Schlager H., Luo B., Frey W., Klingebiel M., Weigel R., Ebert M., Mitev V., Matthey R., Woiwode W., Oelhaf H., Dörnbrack A., Stratmann G., Groß J.-U., Günther G., Vogel B., Müller R., Krämer M., Meyer J., Cairo F. Microphysical properties of synoptic-scale polar stratospheric clouds: in situ measurements of unexpectedly large HNO₃-containing particles in the Arctic vortex // *Atmos. Chem. Phys.* 2014. V. 14. № 19. P. 10785–10801.
<https://doi.org/10.5194/acp-14-10785-2014>
- Montgomery M.T., Brunet G. Vortex Rossby waves on smooth circular vortices: Part II. Idealized numerical experiments for tropical cyclone and polar vortex interiors // *Dynam. Atmos. Oceans.* 2002. V. 35. № 2. P. 179–204.
[https://doi.org/10.1016/S0377-0265\(01\)00088-4](https://doi.org/10.1016/S0377-0265(01)00088-4)
- Newman P., Lait L.R., Schoeberl M., Nash E.R., Kelly K., Fahey D.W., Nagatani R., Toohey D., Avallone L., Anderson J. Stratospheric meteorological conditions in the Arctic polar vortex, 1991 to 1992 // *Science.* 1993. V. 261. № 5125. P. 1143–1146.
<https://doi.org/10.1126/science.261.5125.1143>
- 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.
<https://doi.org/10.1029/2004GL020596>
- Pitts M.C., Poole L.R., Gonzalez R. Polar stratospheric cloud climatology based on CALIPSO spaceborne lidar measurements from 2006 to 2017 // *Atmos. Chem. Phys.* 2018. V. 18. № 15. P. 10881–10913.
<https://doi.org/10.5194/acp-18-10881-2018>
- Polvani L.M., Saravanan R. The three-dimensional structure of breaking Rossby waves in the polar wintertime stratosphere // *J. Atmos. Sci.* 2000. V. 57. № 21. P. 3663–3685.
[https://doi.org/10.1175/1520-0469\(2000\)057<3663:TTD-SOB>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(2000)057<3663:TTD-SOB>2.0.CO;2)
- Rodriguez J.M., Ko M.K.W., Sze N.D., Heisey C.W., Yue G.K., McCormick M.P. Ozone response to enhanced heterogeneous processing after the eruption of Mt. Pinatubo // *Geophys. Res. Lett.* 1994. V. 21. № 3. P. 209–212.
<https://doi.org/10.1029/93GL03537>
- Screen J.A. Simulated atmospheric response to regional and pan-Arctic sea ice loss // *J. Climate.* 2017. V. 30. № 11. P. 3945–3962.
<https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0197.1>
- Screen J.A. Arctic sea ice at 1.5 and 2°C // *Nat. Clim. Change.* 2018. V. 8. P. 362–363.
<https://doi.org/10.1038/s41558-018-0137-6>
- Sigmond M., Fyfe J.C., Swart N.C. Ice-free Arctic projections under the Paris Agreement // *Nat. Clim. Change.* 2018. V. 8. P. 404–408.
<https://doi.org/10.1038/s41558-018-0124-y>
- Sobel A.H., Plumb R.A., Waugh D.W. Methods of calculating transport across the polar vortex edge // *J. Atmos. Sci.* 1997. V. 54. № 18. P. 2241–2260.
[https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1997\)054<2241:MOC-TAT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1997)054<2241:MOC-TAT>2.0.CO;2)

- Solomon S., Garcia R.R., Rowland F.S., Wuebbles D.J.* On the depletion of Antarctic ozone // *Nature*. 1986. V. 321. P. 755–758.
<https://doi.org/10.1038/321755a0>
- Solomon S.* Stratospheric ozone depletion: a review of concepts and history // *Rev. Geophys.* 1999. V. 37. № 3. P. 275–316.
<https://doi.org/10.1029/1999RG900008>
- Solomon S., Kinnison D., Bandoro J., Garcia R.* Simulation of polar ozone depletion: An update // *J. Geophys. Res.* 2015. V. 120. № 15. P. 7958–7974.
<https://doi.org/10.1002/2015JD023365>
- Steiner M., Luo B., Peter T., Pitts M.C., Stenke A.* Evaluation of polar stratospheric clouds in the global chemistry–climate model SOCOLv3.1 by comparison with CALIPSO spaceborne lidar measurements // *Geosci. Model Dev.* 2021. V. 14. № 2. P. 935–959.
<https://doi.org/10.5194/gmd-14-935-2021>
- Stenchikov G., Robock A., Ramaswamy V., Schwarzkopf M.D., Hamilton K., Ramachandran S.* Arctic Oscillation response to the 1991 Mount Pinatubo eruption: Effects of volcanic aerosols and ozone depletion // *J. Geophys. Res.* 2002. V. 107. № 24. P. ACL28.
<https://doi.org/10.1029/2002JD002090>
- Stroeve J., Notz D.* Changing state of Arctic sea ice across all seasons // *Environ. Res. Lett.* 2018. V. 13. № 10. P. 103001.
<https://doi.org/10.1088/1748-9326/aade56>
- Tritscher I., Pitts M.C., Poole L.R., Alexander S.P., Cairo F., Chipperfield M.P., Grooß J.-U., Höpfner M., Lambert A., Luo B., Molleker S., Orr A., Salawitch R., Snels M., Spang R., Woiwode W., Peter T.* Polar stratospheric clouds: Satellite observations, processes, and role in ozone depletion // *Rev. Geophys.* 2021. V. 59. № 2. P. e2020RG000702.
<https://doi.org/10.1029/2020RG000702>
- 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.
[https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1999\)056<1594:COAAAP>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1999)056<1594:COAAAP>2.0.CO;2)
- Waugh D.W., Sobel A.H., Polvani L.M.* What is the polar vortex and how does it influence weather? // *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 2017. V. 98. № 1. P. 37–44.
<https://doi.org/10.1175/BAMS-D-15-00212.1>
- 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.
<https://doi.org/10.1016/j.polar.2019.06.001>
- Zuev V.V., Savelieva E.* Arctic polar vortex dynamics during winter 2006/2007 // *Polar Sci.* 2020. V. 25. P. 100532.
<https://doi.org/10.1016/j.polar.2020.100532>
- Zuev V.V., Savelieva E.S., Pavlinsky A.V.* Analysis of the Arctic polar vortex dynamics during the sudden stratospheric warming in January 2009 // *Arctic and Antarctic Research.* 2021. V. 67. № 2. P. 134–146.
<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2021-67-2-134-146>
- Zuev V.V., Savelieva E.* Sensitivity of polar stratospheric clouds to the Arctic polar vortex weakening in the lower stratosphere in midwinter // *Proc. SPIE.* 2021. V. 11916. P. 1191674.
<https://doi.org/10.1117/12.2599025>
- Zuev V.V., Savelieva E.S., Pavlinsky A.V.* Features of stratospheric polar vortex weakening prior to breakdown // *Atmos. Ocean. Opt.* 2022. V. 35. № 2. P. 183–186.
<https://doi.org/10.1134/S1024856022020142>