

УДК 551.513.11

## ДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ СТРАТОСФЕРЫ АРКТИКИ ЗИМОЙ 2020–2021 г.

© 2021 г. П. Н. Варгин<sup>а, с, \*</sup>, В. В. Гурьянов<sup>б, \*\*</sup>, А. Н. Лукьянов<sup>а, \*\*\*</sup>, А. С. Вязанкин<sup>а, \*\*\*\*</sup>

<sup>а</sup>Центральная аэрологическая обсерватория, Первомайская ул., 3, Долгопрудный, Московская область, 141707 Россия

<sup>б</sup>Казанский федеральный университет, Кремлевская ул., 18, Казань, 420008 Россия

<sup>с</sup>Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Пыжевский пер., 3, Москва, 119017 Россия

\*e-mail: p\_vargin@mail.ru

\*\*e-mail: vladimir.guryanov@kpfu.ru

\*\*\*e-mail: lukyanov@caomsk.mipt.ru

\*\*\*\*e-mail: vzvzvan@mail.ru

Поступила в редакцию 29.04.2021 г.

После доработки 15.07.2021 г.

Принята к публикации 11.08.2021 г.

Зимний сезон 2020–2021 г. в стратосфере Арктики характеризовался стратосферным полярным вихрем, ослабленным в начале января в результате главного внезапного стратосферного потепления, сопровождавшегося усилением Алеутского антициклона. После потепления, продолжавшегося около трех недель, и до завершения зимнего сезона температура внутри стратосферного полярного вихря оставалась выше необходимой для образования полярных стратосферных облаков.

**Ключевые слова:** стратосфера Арктики, планетарные волны, внезапное стратосферное потепление, траекторное моделирование

**DOI:** 10.31857/S0002351521060109

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Циркуляция стратосферы Арктики в зимний сезон (с ноября до апреля) характеризуется сильной межгодовой изменчивостью, определяющей характер разрушения стратосферного озона и влияющей на тропосферу [1]. Основными процессами, определяющими эту изменчивость, является усиление или ослабление стратосферного полярного вихря при уменьшении или усилении распространения планетарных волн из тропосферы. При этом циркуляция стратосферы Арктики не только реагирует на это распространение, но и может его контролировать (т.е. быть более или менее благоприятной): так, скорость среднесезонного ветра и расположение стратосферного полярного вихря могут быть важны для развития внезапных стратосферных потеплений (ВСП).

Усиление стратосферного полярного вихря и его ослабление, особенно в результате ВСП, может влиять на верхнюю атмосферу и циркуляцию тропосферы, в частности на смещение шторм-трека в Северной Атлантике, влияющего на погодные условия Европы [1, 2]. При этом особенности циркуляции тропосферы Северной Атлантики перед ВСП могут способствовать влиянию стратосферы на тропосферу [3].

ВСП, наблюдаемые в среднем два раза за три зимних сезона (т.е. с частотой ~0.6 за год с 1958 г. по 2014 г.) [4], могут приводить к смещению или разделению стратосферного полярного вихря и к изменению направления среднесезонного ветра [2]. В результате роста температуры объем воздушной массы внутри стратосферного полярного вихря с условиями, достаточными для формирования полярных стратосферных облаков (далее для краткости “объем” ПСО), уменьшается, и сильно-го разрушения озона не происходит.

Значительное разрушение озонового слоя в стратосфере Арктики по модельным оценкам может влиять на тропосферу, например, на температуру поверхности в апреле–мае [5]. Хотя возникновение большинства ВСП связано с усилением распространения планетарных волн из тропосферы–нижней стратосферы, некоторые ВСП, как показали модельные эксперименты, могут быть обусловлены собственными осцилляциями полярной стратосферы [6, 7].

При заниженном распространении планетарных волн стратосферный полярный вихрь усиливается, а температура внутри него снижается. При температуре ниже  $-78^{\circ}\text{C}$  формируются ПСО, на частицах которых происходят гетерогенные ре-

акции, разрушающие хлорные (например,  $\text{HCl}$  и  $\text{ClONO}_2$ ) и бромные “резервуарные” соединения. Далее продукты этих реакций в присутствии солнечного излучения превращаются в активные хлорные и бромные компоненты, быстро вступающие в реакции с озоном, разрушая его.

За все годы наблюдений наибольшее разрушение озона в стратосфере Арктики было зафиксировано в зимние сезоны 2010–2011 г. [8] и 2019–2020 г. [9–12]. В отдельные дни весной 2020 г. по данным баллонного зондирования на ряде станций разрушение озона в нижней стратосфере достигало до 90% [13]. Причинами столь сильного стратосферного полярного вихря зимой 2019–2020 г. стало заниженное распространение планетарных волн из тропосферы и их отражение в верхней стратосфере [9, 12].

ВСП сопровождаются похолоданием в мезосфере, которое может составлять десятки градусов, и изменением высоты стратосферы [2]. Эти изменения главным образом обусловлены изменениями распространения гравитационных волн из стратосферы [2, 14]. Изменения температуры в верхней стратосфере и мезосфере в ходе ВСП влияют на их газовый состав: происходит перенос (оседание) из верхней в нижнюю мезосферу и стратосферу, например, оксидов азота ( $\text{NO}_x$ ) [2, 15]. Изменение температуры верхней стратосферы влияет на скорость химических реакций, например, связанных с образованием озона.

Несмотря на пристальное внимание ученых с момента открытия ВСП в начале 1950-х гг. и развитие численных моделей, в настоящее время ВСП прогнозируются в среднем только за 1–2 недели [16, 17].

Сильная межгодовая изменчивость стратосферы Арктики наблюдается в последние годы на фоне продолжающегося роста концентраций парниковых газов, приводящего к снижению температуры стратосферы [18] и снижению концентраций основных озоноразрушающих соединений [19].

Если в стратосфере Арктики зима 2020–2021 г. характеризовалась положительными аномалиями температуры, сильно ослабленным в результате ВСП стратосферным полярным вихрем, то в тропосфере на большей части Северной Евразии и Северной Америки наблюдались значительные отрицательные аномалии температуры [20].

К настоящему времени опубликованы результаты исследования ВСП в январе 2021 г. с использованием первых данных измерений зонального ветра в диапазоне высот от поверхности до 25 км с европейского спутника Aeolus, а также измерений спутникового прибора MLS и данных реанализа ERA5 [21]. В частности, выделены 7 этапов развития ВСП с конца декабря 2020 г. до середины февраля 2021 г. Главное ВСП в начале января 2021 г. стало третьим за последние 4 года и деся-

тым по продолжительности периода с измененным направлением среднезонального ветра с 1979 г. [22].

В настоящей работе рассматривается развитие главного ВСП в январе 2021 г., влияние связанных с ним изменений циркуляции стратосферы и распространения планетарных волн на тропосферу, анализируется эволюция стратосферного полярного вихря.

## 2. ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Анализ динамических процессов стратосферы осуществлялся с использованием ежедневных данных реанализа NCEP [23] и ERA5 [24]. Рассчитывались амплитуды доминирующих в стратосфере планетарных волн с зональными числами от 1 до 3, среднезональный меридиональный поток тепла  $\overline{v'T'}$  (где  $v'$  и  $T'$  – отклонения от среднезональных значений меридионального ветра и температуры), а также 3-мерные векторы Пламба, характеризующие распространение планетарных волн [25]. Аномалии для данных реанализов NCEP и ERA5 рассчитывались относительно средних климатических значений с 1981 г. по 2010 г.

Для анализа динамического взаимодействия стратосферы и тропосферы рассчитывались ежедневные нормированные на стандартное отклонение аномалии геопотенциальной высоты в области  $65^\circ$ – $90^\circ$  с.ш. После умножения на  $-1$  для согласования с индексом Арктической осцилляции (АО) [26] эти значения соответствуют индексу Северной кольцевой моды (СКМ) [27]. АО описывает состояние (моду) изменчивости атмосферных процессов в тропосфере, которой соответствует структура изменчивости давления (геопотенциала) с аномалиями одного знака в полярной области и противоположного знака в поясе  $40^\circ$ – $50^\circ$  с. ш., а СКМ – в стратосфере.

Индекс отражения волновой активности рассчитывался как разность между значениями скорости среднезонального ветра на уровнях давления 2 и 10 гПа в области  $58^\circ$ – $74^\circ$  с.ш. [28]. Положительные значения индекса соответствуют неблагоприятным условиям для отражения планетарных волн, а отрицательные – благоприятным.

Изменение области внутри стратосферного полярного вихря с температурами меньшими  $-78^\circ\text{C}$  и достаточными для формирования ПСО оценивалось с использованием данных реанализа MERRA2 [29, 30].

Для анализа особенностей циркуляции вне тропической тропосферы Северного полушария использовались значения индекса АО с сайта Центра предсказаний климата США [31].

Анализ границы стратосферного полярного вихря осуществлялся с помощью расчета М-функции

[32], характеризующей длину траекторий проходящих через узлы заданной сетки. Поскольку длина траектории складывается из произведений скорости воздушной частицы на каждом шаге по времени на его величину, области максимальных значений  $M$ -функции совпадают с областями наиболее сильного зонального потока. В случае стратосферного полярного вихря эти области совпадают с его границей и характеризуют его изолированность от средних широт.

Для анализа тонкой пространственной структуры стратосферного полярного вихря применялся метод заполнения пространства внутри него обратными траекториями [33]. Оба этих метода применялись с использованием данных реанализа ERA5 с высоким разрешением по долготе–широте ( $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ ) и времени: 1 ч. Ранее эти методы использовались при исследовании аномально сильного стратосферного полярного вихря в Арктике зимой 2019–2020 г. [34].

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ

#### 3.1. Внешние факторы

В экваториальном Тихом океане наблюдалась холодная фаза климатического явления Эль-Ниньо/Южное Колебание–Ла-Нинья, которая обычно сопровождается более холодным стратосферным полярным вихрем в Арктике [35]. Однако до января 2021 г. два очень сильных ВСП в январе 2009 и 2018 гг. произошли в сезоны с Ла-Нинья.

В экваториальной нижней стратосфере с конца лета 2020 г. наблюдалась западная фаза квазидвухлетнего цикла колебаний скорости зонального ветра, при которой усиливается распространение планетарных волн в нижней стратосфере к экватору, что приводит обычно к более холодному стратосферному полярному вихрю [36].

Осцилляция Мадден–Джулиана (ОМД) – колебания параметров циркуляции тропической атмосферы, распространяющиеся в тропиках с запада Индийского океана до центральной части Тихого океана – может влиять на стратосферу Арктики. Больше половины ВСП (13 из 25) с 1979 по 2013 гг. были зарегистрированы в сезоны с усиленной конвекцией в тропиках западной части Тихого океана, что соответствует 6–7-й фазам ОМД на секторной диаграмме, характеризующей ее распространение [37]. Влияние ОМД на стратосферу осуществляется также как при Эль-Ниньо через усиление внутротропических планетарных волн. Распространение связанных с ОМД аномалий конвекции в тропиках центральной части Тихого океана может содействовать ослаблению стратосферного полярного вихря, а заниженное распространение обычно сопровождается сильным вихрем [38]. В ноябре–декабре 2020 г. ОМД характеризовалась низкой активностью и мед-

ленным распространением на восток в тропиках Индийского океана.

Сокращение ледового покрытия в Баренцевом и Карском морях может влиять на распространение планетарных волн в стратосферу [39, 40]. Площадь ледового покрова в Арктике в сентябре 2020 г. была второй наименьшей после сентября 2012 г.

В целом в зимний сезон 2020–2021 г. внешние факторы были неблагоприятными для ослабления арктического стратосферного полярного вихря. Влияние сокращения ледового покрова осенью 2020 г. на распространение планетарных волн в последующую зиму требует отдельного исследования.

#### 3.2. Главное ВСП в начале января 2021 г.

В средней стратосфере скорость среднезонального ветра была выше климатических значений в ноябре–декабре 2020 г. и феврале–марте 2021 г. в области от  $\sim 60^\circ$  до  $80^\circ$  с.ш. на 30–40 м/с (рис. 1а). Главное ВСП с изменением направления (обращением) среднезонального ветра наблюдалось на уровне давления 10 гПа ( $\sim 30$  км) с 5 января по 25 января 2021 г. Наибольшие отрицательные аномалии до  $-30$  м/с выявлены 13–15 января.

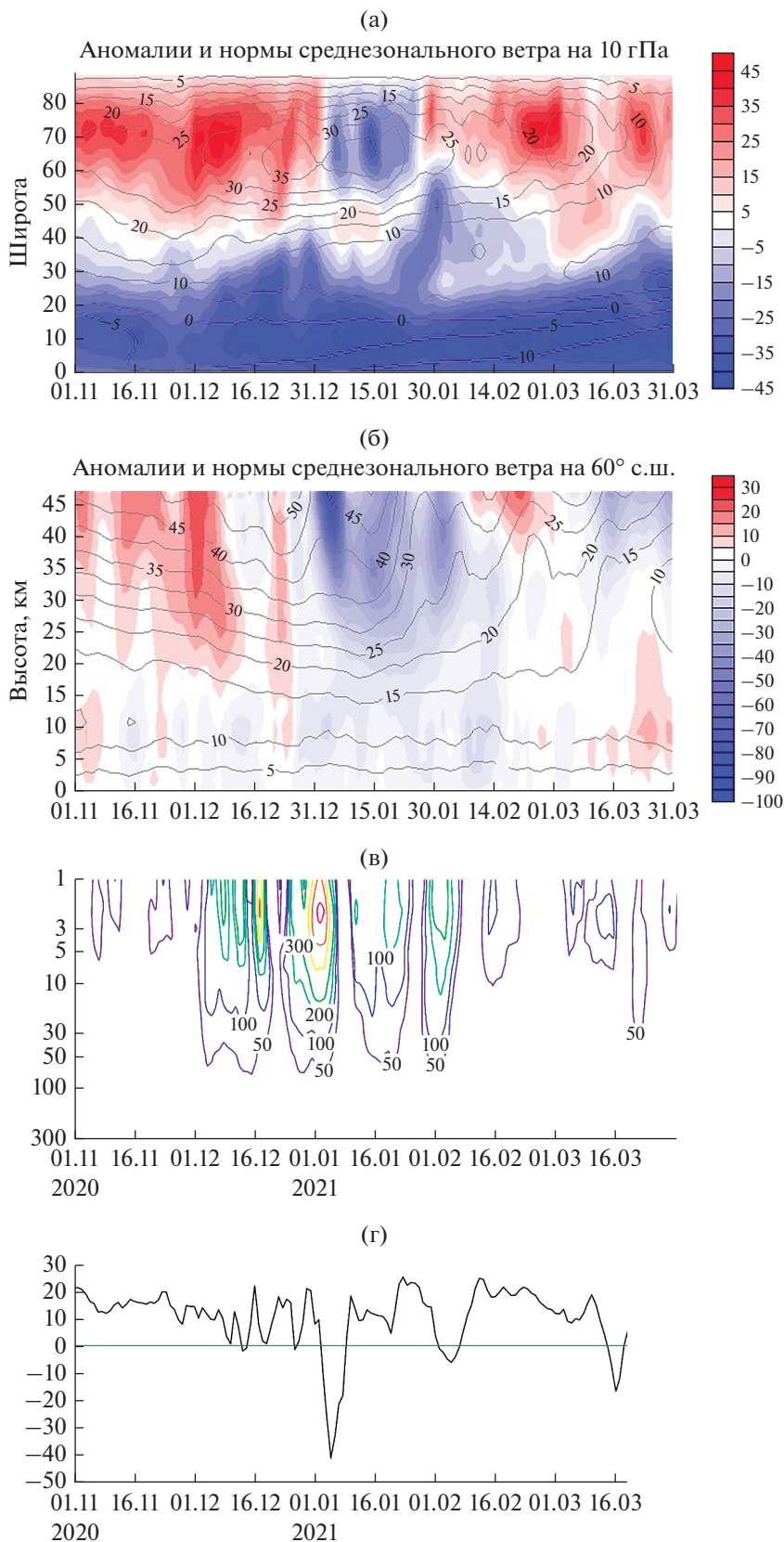
При рассмотрении эволюции аномалий среднезонального ветра на  $60^\circ$  с.ш. обращает на себя внимание кратковременное появление исключительно высоких отрицательных аномалий 3–6 января 2021 г. в верхней стратосфере до  $\sim -100$  м/с вблизи уровня давления 1 гПа ( $\sim 47$  км) (рис. 1б). Анализ данных реанализа ERA5 на модельных уровнях с верхней границей на 0.01 гПа ( $\sim 77$  км) показывает, что максимум аномалий был 4 января на 0.622 гПа ( $\sim 50$  км). Выше, вплоть до 0.01 гПа аномалии убывали.

Перед ВСП в декабре стратосферный полярный вихрь был сильнее обычного в средней и верхней стратосфере. Только во второй половине февраля вихрь восстановился, но с меньшей интенсивностью, чем до ВСП.

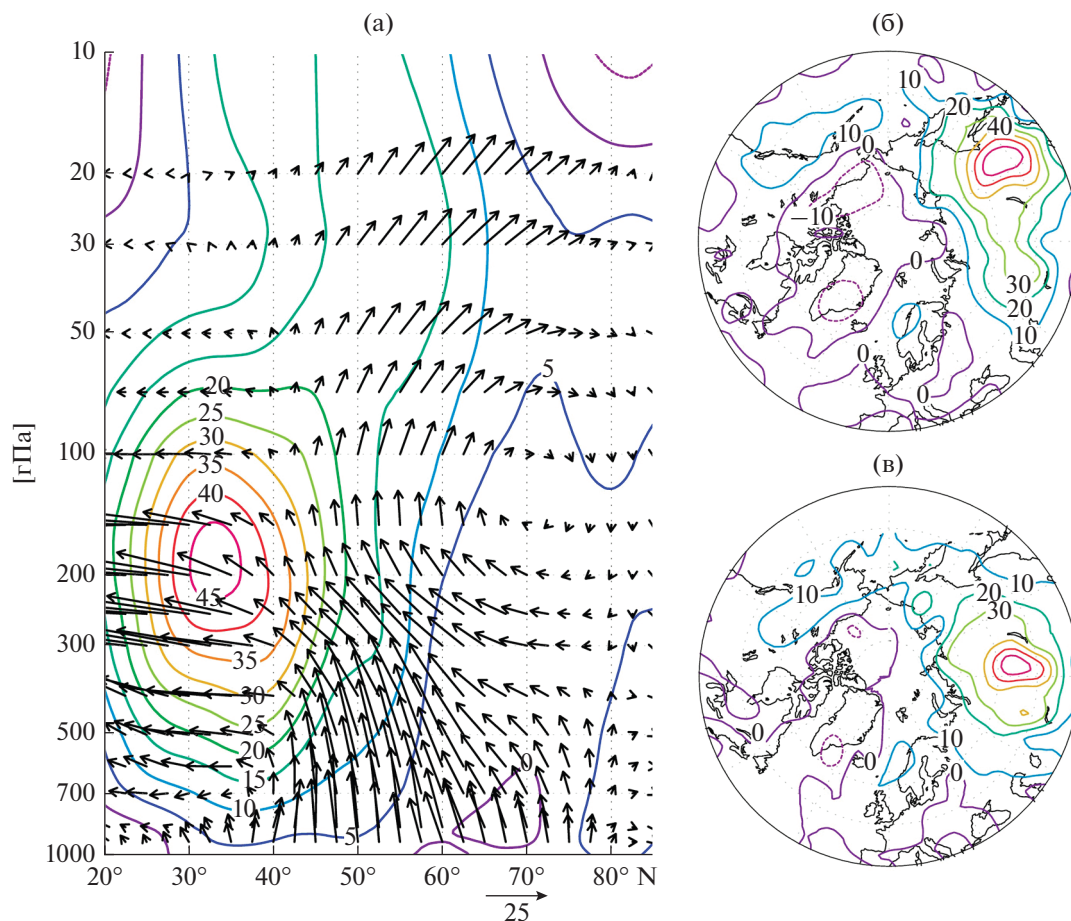
В нижней стратосфере в ноябре–декабре 2020 г. и в феврале–марте 2021 г. преобладали положительные аномалии среднезонального ветра до  $\sim 20$  м/с, а январь в результате ВСП – отрицательные от  $-10$  до  $-25$  м/с.

В период развития ВСП источник волновой активности располагался в тропосфере на северо-востоке Евразии в диапазоне от  $90^\circ$  до  $150^\circ$  в.д. ВСП относится к типу со смещением стратосферного полярного вихря, как сопровождавшееся усилением планетарной волны с зональным числом 1 [22]. Однако, по мнению [21], это ВСП относится к “смешанному” типу с признаками и смещения, и разделения полярного вихря.

Среднезональный вихревой поток тепла, характеризующий распространение волновой ак-



**Рис. 1.** Аномалии (цветная шкала) и климатические значения скорости среднезонального ветра (контуры) в диапазоне широт от экватора до полюса на уровне давления 10 гПа (~30 км) (а) и в диапазоне высот от поверхности до ~48 км на 60° с.ш. с ноября 2020 г. по март 2021 г. (б). Изменение среднезонального меридионального потока тепла (К м/с) в области 50°–80° с.ш. (в) и индекса рефракции волновой активности (м/с) (г) с ноября 2020 г. по март 2021 г.



**Рис. 2.** Широтные и высотные компоненты векторов Пламба ( $\text{м}^2/\text{с}^2$ ) и среднезональный ветер (а), вертикальная компонента вектора Пламба ( $\text{м}^2/\text{с}^2$ ) на уровне давления 30 гПа (б) и 100 гПа (в), осредненные в период 3–5 января 2021 г. Вертикальная компонента  $F_z$  домножена на 100 (также как на рис. 5а).

тивности в стратосферу, усилился в декабре и достиг максимальных значений в период ВСП – в начале января 2021 г. (рис. 2). После этого в средней стратосфере наблюдался кратковременный период отрицательных значений этого потока – т.е. отражения планетарных волн. Затем наибольшие значения этого потока были в начале февраля, после чего вновь наблюдалось отражение планетарных волн, при этом область отрицательных значений охватывала диапазон высот от средней стратосферы до нижней тропосферы. Рассчитанный по методике [24] индекс отражения характеризуется кратковременным минимумом в начале января 2021 г. после ВСП, достигшим до  $-40$  м/с, и двумя небольшими областями отрицательных значений в начале февраля и середине марта, составивших менее  $-10$  и  $-20$  м/с соответственно (рис. 2г). Следовательно, в эти периоды в верхней стратосфере были благоприятные условия для отражения планетарных волн.

Развитие ВСП сопровождалось усилением распространения планетарных волн, характеризу-

емых векторами Пламба, в стратосферу (рис. 2а). В нижней стратосфере область положительных значений вертикальной компоненты вектора Пламба (направленных вверх потоков волновой активности) выявлена от Центральной Азии до востока Китая, где был ее максимум (рис. 2б). В средней стратосфере максимальные значения этой компоненты наблюдались западнее Байкала (рис. 2в).

В последние годы обсуждается необходимость совершенствования предложенного Всемирной метеорологической организацией в 1970-х гг. определения ВСП (изменение направления среднезонального ветра на 10 гПа и  $60^\circ$  с.ш.) [41], т.к. некоторые ВСП, не попадающие под это определение (минорные), могут влиять на циркуляцию стратосферы–тропосферы, озоновый слой как, например, ВСП в начале января 2015 г. [42].

Предложено классифицировать ВСП на два типа: сопровождающиеся осцилляциями среднезонального ветра (продолжительные с изменением его направления до высот нижней стратосферы) или без них и без влияния на нижнюю

стратосферу [43]. Так как ВСП в январе 2021 г. сопровождалось замедлением зонального ветра до высот нижней стратосферы в течение около трех недель, то оно относится к первому типу.

В зависимости от характера распространения планетарных волн предложена классификация ВСП на отражающий и поглощающий типы [44]. В первом случае длительность и меридиональная протяженность области с восточным ветром меньше, чем во втором, когда продолжающееся после начала ВСП поглощение энергии волн поддерживает связанные с ВСП изменения температуры стратосферы. По этой классификации ВСП в январе 2021 г. соответствует поглощающему типу, как сопровождавшееся поглощением энергии волн, распространяющихся из тропосферы, которое поддерживало изменения стратосферы в течение трех недель. Наблюдалось и отражение планетарных волн в нижнюю стратосферу и тропосферу.

### 3.3. Волновая активность

Усиление планетарной волны с зональным числом 1 в средней стратосфере с начала декабря (рис. 3а) связано с усилением Алеутского антициклона (АА). В нижней стратосфере и верхней тропосфере сравнимо усиления планетарной волны 1 в декабре не было (рис. 3б, 3в).

АА — крупномасштабный антициклон в стратосфере, наблюдающийся в зимний сезон от Чукотки до Аляски и северо-запада Канады ( $40^{\circ}$ – $80^{\circ}$  с.ш.,  $120^{\circ}$  в.д.– $100^{\circ}$  з.д.) с центром вблизи Алеутских островов [45]. С 1978 г. по 2014 г. выявлено 68 периодов наблюдения АА, т.е. ~2 раза за зимний сезон, с продолжительностью ~32 дня. Часто смещение или разделение стратосферного полярного вихря сопровождается или следует за образованием АА. Образование АА преимущественно связано со стратосферными процессами: переносом теплых воздушных масс и потоков тепла.

В начале декабря 2020 г. в области АА ( $40^{\circ}$ – $80^{\circ}$  с.ш.,  $120^{\circ}$  в.д.– $100^{\circ}$  з.д.) в стратосфере наблюдалось резкое усиление меридионального потока тепла. В средней стратосфере это усиление было в течение примерно недели, в нижней стратосфере и верхней тропосфере — более месяца. Так как в тропосфере в начале декабря не было выявлено блокирующих антициклонов над севером Тихого океана, можно предположить, что усиление АА было связано со стратосферными процессами.

Сравнение данных геопотенциала в первую неделю декабря с последней неделей ноября 2020 г. показывает: усиление Алеутского минимума в тропосфере и одновременно усиление АА в стратосфере. При этом температура вблизи поверхности в высоких широтах Северного полушария

снижается везде, кроме Канады, где она увеличилась.

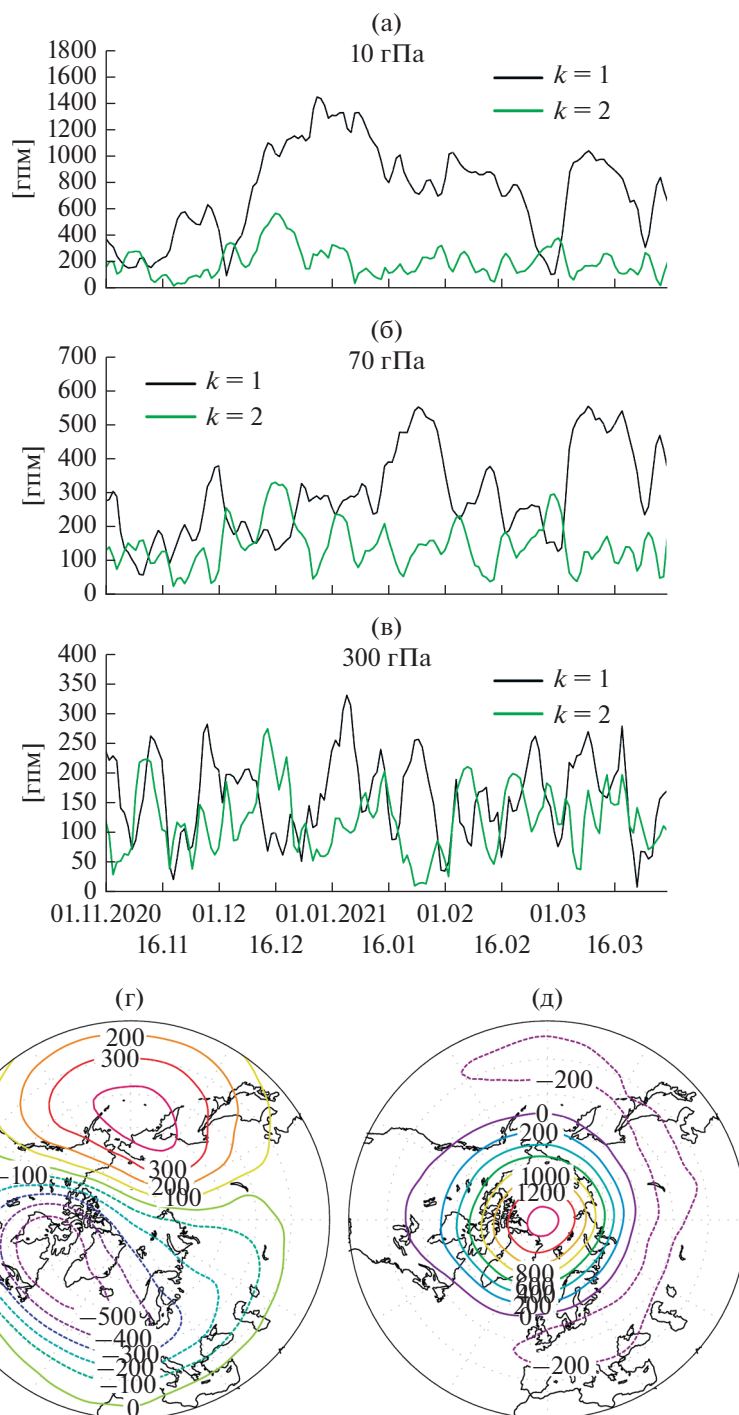
Если в декабре 2020 г. в средней стратосфере аномалии геопотенциала характеризовались пространственной структурой планетарной волны с зональным числом 1: с Алеутским максимумом и областью полярного вихря над Северной Атлантикой, то в январе 2021 г. в результате ВСП максимальные положительные аномалии со значениями более 1400 гпм наблюдались над полюсом (рис. 3г, 3д).

### 3.4. Взаимодействие стратосферы и тропосферы

Аномалии приземной температуры воздуха и осадков во внетропической тропосфере Северного полушария на межгодовых и десятилетних масштабах во многом характеризуются Арктической осцилляцией [46–48]. При положительной фазе АО вследствие сильного градиента давления между полюсом и средними широтами сильные зональные ветра не позволяют холодным воздушным массам из полярного региона распространяться в высокие и средние широты. При отрицательной фазе АО доминирует меридиональный перенос, приводящий к более холодным погодным условиям во многих регионах средних и высоких широт. Взаимодействие между стратосферой и тропосферой может быть причиной изменений фазы АО [46]. Сильный стратосферный вихрь часто сопровождается положительной фазой АО, а слабый — отрицательной. Например, в зимний сезон 2019–2020 г. с экстремальной интенсивностью положительной фазы АО и значительными положительными аномалиями температуры во многих регионах Северной Евразии [49] стратосферный полярный вихрь был очень сильным, холодным и устойчивым [9–12].

В отличие от предыдущего зимний сезон 2020–2021 г. характеризуется отрицательной фазой АО, переход на которую произошел в начале декабря. Среднемесячные значения индекса АО для этой зимы и еще двух других зим с ВСП в январе 2010 и 2013 гг. представлены на рис. 4а. В декабре и феврале значения индекса АО в зимние сезоны 2012–2013 и 2020–2021 гг. практически совпадают и составляют ~–1.5 и –1 соответственно. В январе 2021 г. значения индекса АО (~–2.4) примерно соответствует индексу в январе 2010 г. В марте 2010 и 2013 гг. индекс АО оставался отрицательным, в то время как в марте 2021 г. он стал положительным (+2.1). Ежедневные значения индекса АО показывают, что отрицательная фаза АО сменилась на положительную фазу в середине февраля 2021 г.

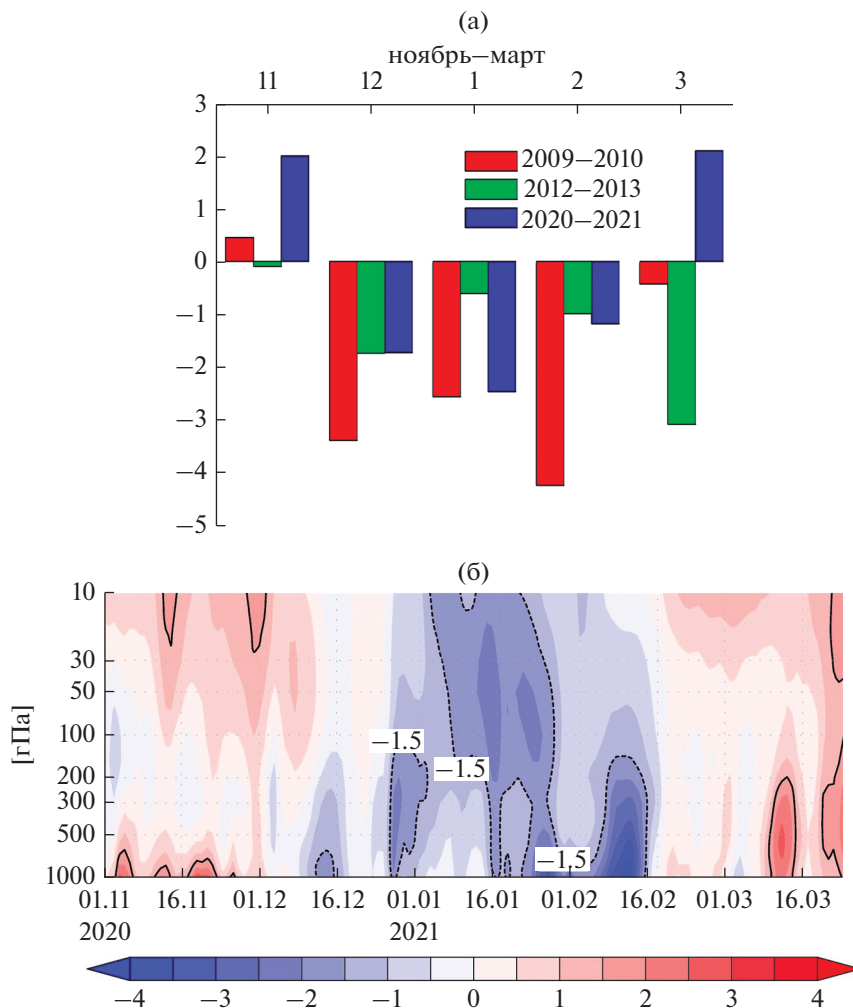
Индекс Северной кольцевой моды (СКМ) в диапазоне высот от поверхности до средней стратосферы характеризовался положительными зна-



**Рис. 3.** Изменение амплитуды планетарных волн с зональными числами 1 и 2 в геопотенциальной высоте (гпм) при осреднении по области  $50^{\circ}$ – $70^{\circ}$  с.ш. с ноября 2020 г. по март 2021 г. на уровнях давления 10, 70 и 300 гПа (а, б, в). Аномалии геопотенциальной высоты (гпм) на уровне давления 10 гПа ( $\sim 30$  км) в декабре 2020 г. (г) и январе 2021 г. (д).

чениями в средней стратосфере, превышающими по модулю  $1.5\sigma$  (где  $\sigma$  – среднее квадратичное отклонение), только вблизи 10 гПа в начале декабря и отрицательными значениями вблизи поверхности в середине декабря (рис. 4б). С конца декабря и до середины февраля от поверхности до средней

стратосферы выявлены отрицательные значения, соответствующие сильному стратосферному полярному вихрю. Области со значениями индекса СКМ менее  $-1.5\sigma$  наблюдались сначала несколько дней в тропосфере, а потом в середине и во второй половине января от средней стратосферы



**Рис. 4.** Изменение индекса Арктической осцилляции с ноября по март в зимние сезоны 2009–2010, 2012–2013 и 2020–2021 гг. (а), изменение индекса Северной кольцевой моды (СКМ) с ноября 2020 г. по март 2021 г. (б).

до тропосферы. Значение индекса СКМ, превышающее по модулю 1.5σ, в качестве порогового при определении влияния ослабления/усиления полярного вихря на тропосферу предложено в работе [50].

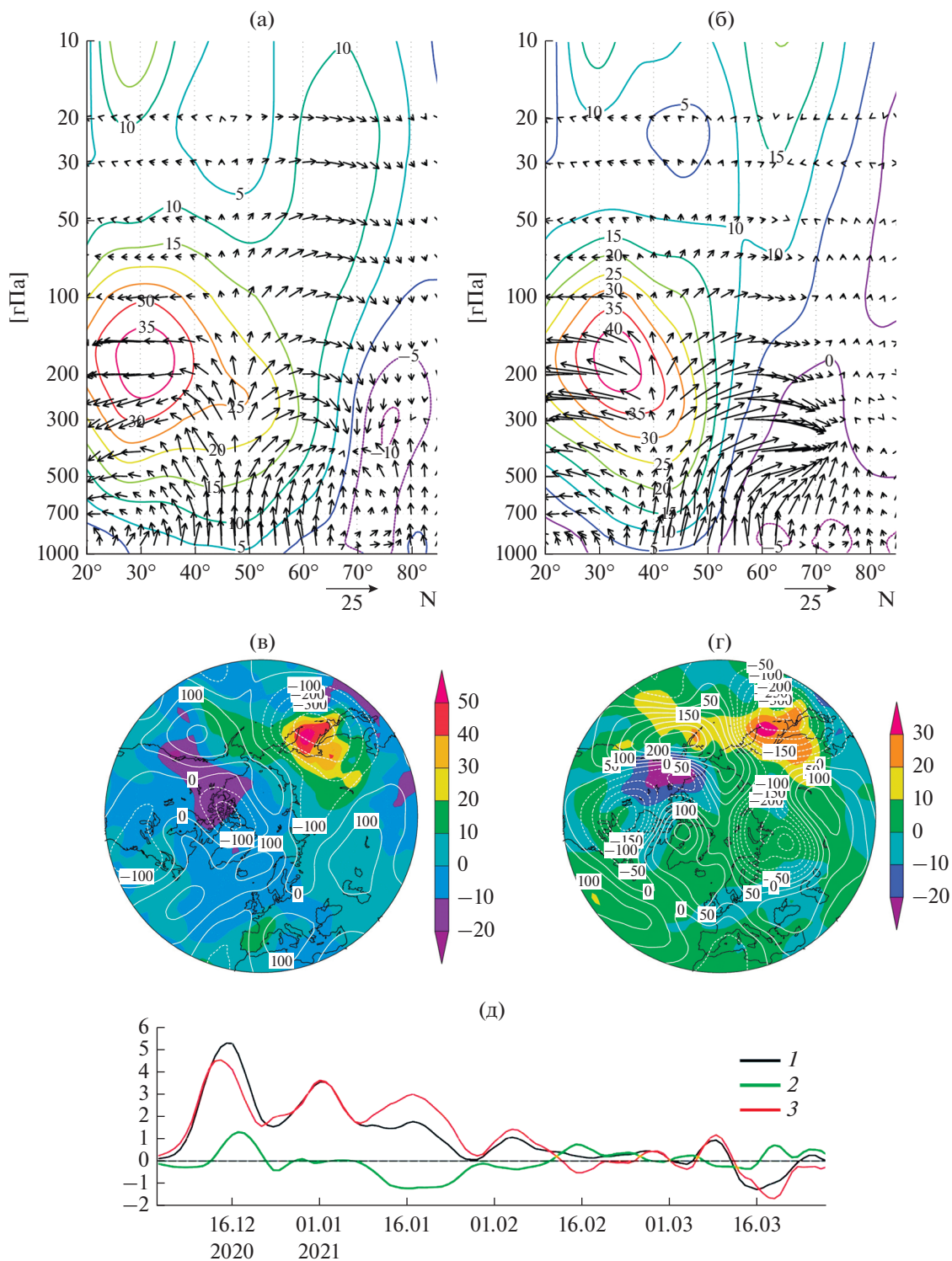
Одним из механизмов влияния изменений стратосферного полярного вихря на тропосферу является отражение потоков волновой активности из верхней стратосферы в нижнюю стратосферу и тропосферу. Выявлена связь отражения планетарных волн из стратосферы в тропосферу и резких похолоданий (усиления областей низкого давления или “волн холода”) на севере Северной Америки [51], в частности, в феврале 2018 г. [52]. Ранее влияние отражения планетарных волн на похолодание на востоке Канады было выявлено в марте 2007 г. [53] и в конце декабря 2017 г.—начале января 2018 г. [54].

В начале февраля 2020 г. в области высоких широт ( $\sim 60^\circ\text{--}80^\circ$  с.ш.) в средней и нижней стра-

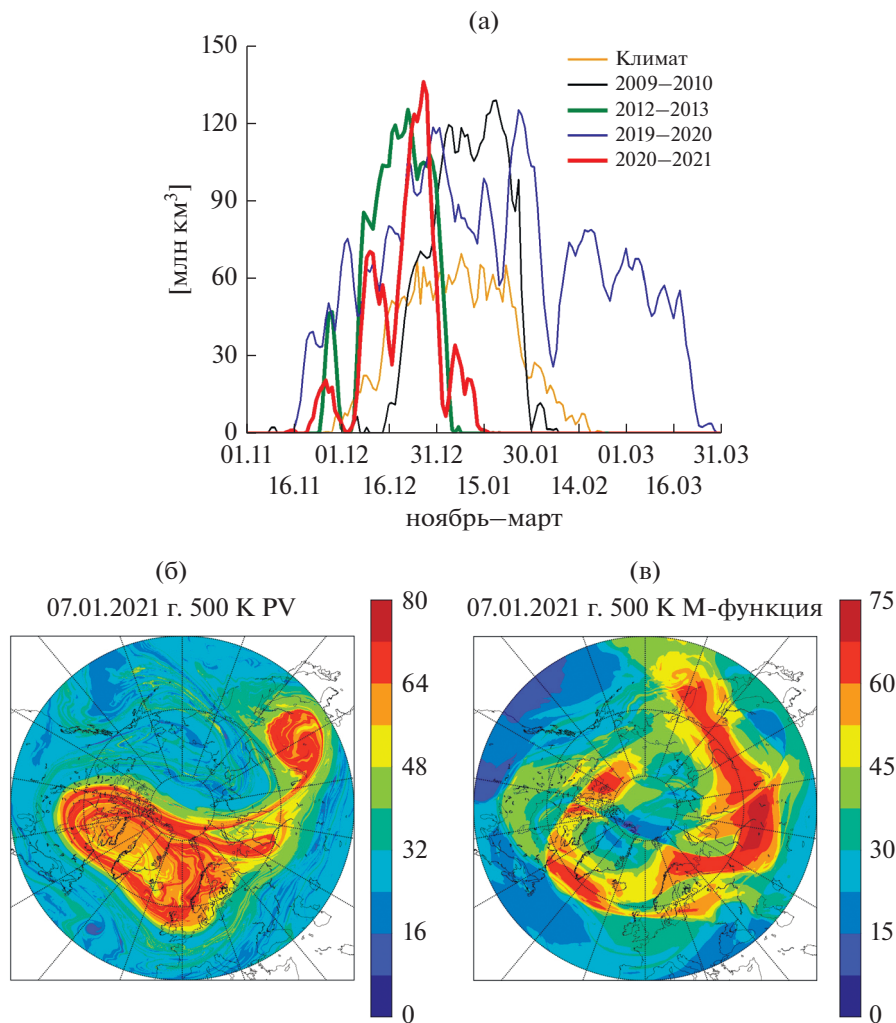
тосфере выявлено отражение планетарных волн в тропосферу. Это отражение видно на среднезональных диаграммах векторов Пламба (рис. 5а, 5б). Анализ долготной структуры векторов Пламба показывает, что наибольшее распространение планетарных волн в среднюю стратосферу из нижней наблюдалось над Сахалином—Охотским морем, а вниз в тропосферу — над северо-западом Канады и Аляской (рис. 5в, 5г). Такое распространение (вверх над востоком Евразии и вниз над севером Северной Америки) является характерным [51, 55]. Сравнение двух периодов (4–6 и 8–10 февраля 2021 г.) показывает усиление в тропосфере области пониженного давления, над которой происходило отражение планетарных волн, и распространение этой области к центру и юго-востоку США.

Для характеристики отражения планетарных волн над Канадой предложен региональный индекс, рассчитываемый как разность между мери-





**Рис. 5.** Широтные и высотные компоненты векторов Пламба ( $m^2/c^2$ ) и среднезональный ветер (а, б), вертикальная компонента вектора Пламба ( $m^2/c^2$ ) на уровне давления 100 гПа (в, г), осредненные за периоды 4–6 февраля и 8–10 февраля 2021 г. Меридиональный поток тепла ( $K\ m/s$ ) на уровне давления 100 гПа, осредненный по областям  $120^\circ$  в.д.– $175^\circ$  з.д. (1) и  $135^\circ$ – $60^\circ$  з.д. (2), нормированный на соответствующие среднеквадратичные отклонения, и различие между ними (3) с декабря 2020 г. по март 2021 г. (д)



**Рис. 6.** Изменение “объема” ПСО 1-го типа (млн км<sup>3</sup>) с ноября по март в зимние сезоны 2009–2010, 2012–2013, 2019–2020, 2020–2021 гг. и среднее за период с 1979 г. по 2020 г. (а). Карты потенциальной завихренности ( $\text{К м}^2 \text{кг}^{-1} \text{с}^{-1} \times 10^{-6}$ ) (б) и поля М-функции в единицах ( $10^{-3} \text{ км}$ ) (в) для 7 января 2021 г. на уровне потенциальной температуры 500 К ( $\sim 50 \text{ гПа} / \sim 20 \text{ км}$ ).

диональными вихревыми потоками тепла ( $v'T'$ ) в нижней стратосфере (на 100 гПа) в области от 45° до 75° с.ш. над Восточной Сибирью–севером Тихого океана (от 120° в.д. до 175° з.д.) и Канадой (от 135° до 60° з.д.), нормированными на соответствующие среднеквадратичные отклонения [52]. Значения таких потоков над первым и вторым регионами, сглаженные с использованием бегущего среднего за 5 сут, и разность между ними с декабря 2020 г. по март 2021 г. представлены на рис. 5д. Выделяются 4 периода с продолжительностью около недели, когда в нижней стратосфере наблюдалось восходящее распространение планетарных волн над Сибирью и нисходящее распространение (отражение) над Канадой (положительные и отрицательные значения соответственно): в начале декабря, в середине января, в начале февраля и середине марта. Причем только

в середине января 2021 г. значение потока тепла над Канадой было меньше  $-1\sigma$ , а соответствующее значение индекса отражения  $\sim 3\sigma$ . В начале февраля значение потока над Канадой достигало до  $-0.3\sigma$ , над Сибирью более  $1\sigma$ , как и соответствующее значение индекса отражения.

### 3.5. Изменения стратосферного полярного вихря

В результате главного ВСП в начале января 2021 г. “объем” ПСО 1-го типа (состоящих из соединений азотной кислоты) уменьшился от максимальных значений за зимний сезон  $\sim 140$  млн км<sup>3</sup>, наблюдавшихся в конце декабря, до нулевых значений к середине января (рис. 6а). Интересно, что максимальные значения “объема” ПСО в конце декабря 2020 г. превышали значения зимы 2019–

2020 г. с рекордным разрушением стратосферного озона.

После ВСП в начале января 2021 г. и до конца зимнего сезона увеличения “объема” ПСО не произошло. Видно сходство резкого снижения “объема” ПСО в начале января 2021 г. и в начале января 2013 г., когда также произошло главное ВСП, но с разделением стратосферного полярного вихря [56–58]. В зимний сезон 2009–2010 г. резкое снижение “объема” ПСО (без последующего восстановления) произошло в результате главного ВСП в конце января 2010 г.

Ненулевой “объем” ПСО 2-го типа, состоящих из ледяных частиц и образующихся в основном в Антарктике, выявлен в зимний сезон 2020–2021 г. в Арктике лишь 25 декабря 2020 г.

В результате ВСП в средней и нижней стратосфере центр стратосферного полярного вихря был сдвинут к Европе усилившимся Алеутским максимумом. Форма вихря напоминала бумеранг от Гренландии до северо-востока Евразии. В середине января у вихря образовались два центра: меньший – южнее Гренландии, значительно более сильный – над севером Сибири. К концу января 2021 г. наблюдался только один центр вихря над севером Сибири. В начале февраля вихрь опять вытянулся, образовались два центра, центр над Северной Атлантикой усиливался, а над севером Сибири ослабевал.

Для исследования особенностей горизонтальной структуры стратосферного полярного вихря и его границы в начальный период ВСП были проведены расчеты полей потенциальной завихренности (PV) и M-функции по аналогии с [32]. На рис. 6б в представлены карты PV и M-функции для нижней стратосферы на изэнтропическом уровне 500 К (~50 гПа/~20 км) для 7 января 2021 г., сразу после главного ВСП. M-функция, характеризующая силу вихря и его границу, имеет размытую структуру, обеспечивая массообмен полярных воздушных масс со средними широтами.

Как показывает структура поля PV, сам вихрь имеет тенденцию к расщеплению на отдельные фрагменты, что и произошло позднее. В условиях сильного, изолированного вихря M-функция имеет четкую форму изменяющегося “кольца”, как в зимний 2019–2020 г. [34].

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основной особенностью зимнего сезона 2020–2021 г. в стратосфере Арктики является главное ВСП в начале января с продолжительностью около трех недель. ВСП произошло при западной фазе квазидвухлетнего цикла колебаний зонального ветра в экваториальной стратосфере и при холодной фазе климатического явления Эль-Ниньо: Ла-Нинья, которые обычно сопровождаются бо-

лее слабым распространением планетарных волн в стратосферу Арктики и, как следствие, более холодным стратосферным полярным вихрем.

ВСП сопровождалось усилением в стратосфере Алеутского антициклона, соответствующим усилению планетарной волны с зональным числом 1, а также распространением планетарных волн вверх в нижней и средней стратосфере над северо-восточной Евразией, с максимумом вблизи Байкала. После ВСП в начале января в верхней стратосфере наблюдалось отражение планетарных волн, однако оно не распространялось до нижней стратосферы. В отличие от этого в начале февраля распространение планетарных волн в стратосферу над северо-востоком Евразии и последующее отражение из средней в нижнюю стратосферу и тропосферу выявлено над северо-западом Канады, которое сопровождалось понижением давления и похолоданием. В последующие дни это похолодание распространилось до центра и юга США.

Циркуляция тропосферы средних-высоких широт Северного полушария с декабря 2020 г. характеризовалась отрицательной фазой АО со значительными отрицательными аномалиями температуры. Во второй половине января в высоких широтах наблюдалось непрерывное распространение аномалий циркуляции стратосферы, характеризующих индексом Северной кольцевой моды, до нижней тропосферы со значениями, превышающими 1.5σ.

Восстановление стратосферного полярного вихря в конце февраля 2021 г. сопровождалось резким изменением фазы АО с отрицательной на положительную, усилившуюся в марте. Если среднемесячное значение индекса АО в январе составило –2.4, в феврале –1.1, то в марте уже +2.1.

В результате ВСП температура нижней стратосферы внутри стратосферного полярного вихря увеличилась, что привело к достаточно быстрому исчезновению ПСО, необходимых для сильного разрушения озона. “Объем” ПСО от максимальных значений за зимний сезон ~140 млн км<sup>3</sup> в конце декабря уменьшился к середине января 2021 г. до нуля и до конца зимнего сезона уже не увеличился.

Результаты траекторного моделирования горизонтальной структуры стратосферного полярного вихря после главного ВСП в начале января 2021 г. показывают, что граница вихря в нижней стратосфере демонстрирует неоднородность с размытой структурой в некоторых областях, что создавало условия для обмена воздушными массами между областью вихря и средними широтами.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований: грант № 19-05-00370 (П.Н. Варгин, А.Н. Лукьянов) и грант № 20-55-00014 Бел\_а (В.В. Гурьянов).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Baldwin M., Birner T., Brasseur G., Burrows J., Butchart N., Garcia R., Geller M., Gray L., Hamilton K., Harnik N., Hegglin M., Langematz U., Robock A., Sato K., Scaije A. 100 Years of Progress in Understanding the Stratosphere and Mesosphere // *Meteorol. Monogr.* 2019. V. 59. Chapter 27.
2. Baldwin M., Ayarzagüena B., Birner T., Butchart N., Butler A., Charlton-Perez A., Domeisen D., Garfinkel C., Garry H., Gerber E., Hegglin M., Langematz U., Pedatella N. Sudden Stratospheric Warmings // *Rev. Geophys.* 2021. V. 58, e2020RG000708.
3. Domeisen D., Grams C., Papritz L. The role of North Atlantic–European weather regimes in the surface impact of sudden stratospheric warming events // *Weather Clim. Dynam.* 2020. V. 1. P. 373–388.
4. Butler A., Sjöberg J., Seidel D., Rosenlof K. A sudden stratospheric warming compendium // *Earth System Science Data* 2017. V. 9. P. 63–76.
5. Calvo N., Polyani L., Solomon S. On the surface impact of Arctic stratospheric ozone extremes // *Environ. Res. Lett.* 2015. V. 10. 094003
6. Sjöberg J. P., Birner T. Stratospheric wavenumber flow feedbacks and sudden stratospheric warmings in a simple model forced by upward wave activity flux // *J. Atmos. Sci.* 2014. V. 71. P. 4055–4071.
7. Pogoreltsev A., Savenkova E., Aniskina O., Ermakova T., Chen W., Wei K. Interannual and intraseasonal variability of stratospheric dynamics and stratosphere-troposphere coupling during northern winter // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2015. V. 136. P. 187–200.
8. Manney G., Santee M., Rex M., Livesey N., Pitts M., Veefkind P., Nash E., Wohltmann I., Lehmann R., Froidevaux L., Poole L., Schoeberl M., Haffner D., Davies J., Dorokhov V., Gernandt H., Johnson B., Kivi R., Kyrö E., Larsen L., Levelt P., Makshtas A., McElroy C., Nakajima H., Parrondo M., Tarasick D., von der Gathen P., Walker K., Zinoviev N. Unprecedented Arctic ozone loss in 2011 // *Nature*. V. 478. P. 469–475. 2011.
9. Lawrence Z., Perlwitz J., Butler A., Manney G., Newman P., Lee S., Nash E. The remarkably strong arctic stratospheric polar vortex of winter 2020: links to record-breaking Arctic oscillation and ozone loss // *J. Geophys. Res.* 2020. V. 125.
10. Manney G., Livesey N., Santee M., Lawrence Z., Lambert A., Millan L., Fuller R. Record low Arctic stratospheric ozone in 2020: MLS polar processing observations compared with 2016 and 2011 // *Geophys. Res. Lett.* 2020. V. 47. e2020GL089063.
11. Цветкова Н.Д., Варгин П.Н., Лукьянов А.Н., Кирюшов Б.М., Юшков В.А., Хамматов В.У. Исследование химического разрушения озона и динамических процессов в стратосфере Арктики зимой 2019–2020 г. // *Метеорология и гидрология.* 2021.
12. Smyshlyaev S.P., Vargin P.N., Lukyanov A.N., Tsvetkova N.D., Motsakov M.A. Dynamical and chemical processes contributing to ozone loss in the exceptional Arctic stratosphere winter-spring of 2020 // *Atmos. Chem. Phys. Discuss.* <https://doi.org/10.5194/acp-2021-11>
13. Wohltmann I., von der Gathen P., Lehmann R., Maturilli M., Deckelmann H., Manney G. L., Davies J., Tarasick D., Jepsen N., Kivi R., Lyall N., Rex M. Near-complete local reduction of Arctic stratospheric ozone by severe chemical loss in spring 2020 // *Geophys. Res. Lett.* 2020. V. 47. e2020GL089547.
14. Zülicke Ch., Becker E. The structure of the mesosphere during sudden stratospheric warmings in a global circulation model // *J. Geophys. Res.: Atmos.* 2013. V. 118. P. 2255–2271.
15. 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<sub>2</sub> и O<sub>3</sub> // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана.* 2017. Т. 53. № 5. С. 545–555.
16. Domeisen D., Butler A., Charlton-Perez A., Ayarzagüena B., Baldwin M., Dunn-Sigouin E., Furtado J., Garfinkel C., Hitchcock P., Karpechko A., Kim H., Knight J., Lang A., Lim E-P., Marshall A., Roff G., Schwartz C., Simpson I., Son S.-W., Taguchi M. The role of the stratosphere in subseasonal to seasonal prediction: 1. Predictability of the stratosphere // *J. Geophys. Res.: Atmos.* V. 125. 2020. e2019JD030920.
17. Tsvetkova N.D., Vyzankin A.S., Vargin P.N., Lukyanov A.N., Yushkov V.A. Investigation and forecast of Sudden Stratospheric Warming events with chemistry climate model SOCOL // *IOP Conf. Series, Earth Environmental Science.* 2020. V. 606. 012062. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/606/1/012062>
18. Garcia R., Yue J., Russell J. Middle atmosphere temperature trends in the twentieth and twenty-first centuries simulated with the Whole Atmosphere Community Climate Model (WACCM) // *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2019. V. 124. P. 7984–7993.
19. World Meteorological Organization (WMO). Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2018; Global Ozone Research and Monitoring Project. Report No. 58; Meteorological Organization: Geneva, Switzerland, 2018.
20. Press-release WMO. <https://public.wmo.int/en/media/news/extreme-weather-hits-usa-europe>
21. Wright C., Hall R., Banyard T., Hindley N., Mitchell D., Seviour W. Dynamical and Surface Impacts of the January 2021 Sudden Stratospheric Warming in Novel Aeolus Wind Observations, MLS and ERA5 // *Weather and Climate Dynamics Discussions.* 2021.
22. Lee S.H. The January 2021 Sudden Stratospheric Warming // *Weather.* 2021. V. 76. № 4. P. 135–136.
23. Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R., Collins W., Deaven D., Gandin L., Iredell M., Saha S., White G., Woollen J., Zhu Y., Chelliah M., Ebisuzaki W., Higgins W., Janowiak J., Mo K., Ropelewski C., Wang J., Leetmaa A., Reynolds R., Jenne R., Joseph D. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project // *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 1996. V. 77. P. 437–470.
24. 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., Hólm E., Janisková M., Keeley S., Laloyaux P., Lopez P., Lupu C., Radnoti G., de Rosnay P., Rozum I., Vamborg F., Villalume S., Thépaut J.-N.* The ERA5 global reanalysis 1999–2049 // *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 2020. V. 146. P. 1999–2049.
25. *Plumb R.* On the Three-Dimensional Propagation of Stationary Waves // *J. Atmos. Sci.* 1985. V. 42. P. 217–229.
26. *Thompson D.W., Wallace J.M.* Arctic Oscillation signature in wintertime geopotential height and temperature fields // *Geophys. Res. Lett.* 1998. V. 25. P. 1297–1300.
27. *Baldwin M.P., Thompson D.W.* A critical comparison of stratosphere-troposphere coupling indices // *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 2009. V. 135. P. 1661–1672.
28. *Perlwitz J., Harnik N.* Downward coupling between the stratosphere and troposphere: The relative roles of wave and zonal mean processes // *J. Climate.* 2004. V. 17. P. 4902–4909.
29. *Gelaro R., McCarty W., Suárez M. J., Todling R., Molod A., Takacs L., Randles C., Darmenov A., Bosilovich M., Reichle R., Wargan K., Coy L., Cullather R., Draper C., Akella S., Buchard V., Conaty A., da Silva A., Gu W., Kim G.-K., Koster R., Lucchesi R., Merkova D., Nielsen J., Partyka G., Pawson S., Putman W., Rienecker M., Schubert S., Sienkiewicz M., Zhao B.* The Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, Version 2 (MERRA-2) // *J. Climate.* 2017. V. 30. P. 5419–5454.
30. [https://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/meteorology/temp\\_2020\\_ERRA2\\_NH.html](https://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/meteorology/temp_2020_ERRA2_NH.html)
31. [https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/daily\\_ao\\_index/ao.shtml](https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/daily_ao_index/ao.shtml)
32. *Smith M.L., McDonald A.J.* A quantitative measure of polar vortex strength using the function M // *J. Geophys. Res.: Atmos.* 2014. V. 119. P. 5966–5985.
33. *Sutton R.T., MacLean H., Swinbank R., O'Neill A., Taylor F.W.* High-resolution stratospheric tracer fields estimated from satellite observations using Lagrangian trajectory calculations // *J. Atmos. Science.* 1994. V. 51. P. 2995–3005.
34. *Лукьянов А.Н., Варгин П.Н., Юшков В.А.* Лагранжевые исследования аномально устойчивого арктического полярного стратосферного вихря зимой 2019–2020 г. // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана.* 2021. Т. 57. № 3. С. 1–8.
35. *Domeisen D.I., Garfinkel C.I., Butler A.H.* The teleconnection of El Niño Southern Oscillation to the stratosphere // *Rev. Geophys.* 2019. V. 57. P. 5–47.
36. *Holton J.R., Tan H.-C.* The Quasi-Biennial Oscillation in the Northern Hemisphere lower stratosphere // *J. Meteorol. Soc. Japan.* 1982. V. 60. P. 140–148.
37. *Schwartz C., Garfinkel C.I.* Relative roles of the MJO and stratospheric variability in North Atlantic and European winter climate // *J. Geophys. Res.: Atmos.* 2017. V. 122. P. 4184–4201.
38. *Garfinkel C., Benedict J., Maloney E.* Impact of the MJO on the boreal winter extratropical circulation // *Geophys. Res. Lett.* 2014. V. 41. P. 6055–6062.
39. *Zhang P., Wu Y., Smith K.L.* Prolonged effect of the stratospheric pathway in linking Barents–Kara Sea ice variability to the mid-latitude circulation in a simplified model // *Climate Dynamics.* 2018. V. 50. P. 527–539.
40. *Hoshi K., Ukita J., Honda M., Nakamura T., Yamazaki K., Miyoshi Y., Jaiser R.* Weak stratospheric polar vortex events modulated by the Arctic sea-ice loss // *J. Geophys. Res.* 2019. V. 124. P. 858–869.
41. *Butler A., Seidel D., Hardiman S., Butchart N., Birner T., Match A.* Defining Sudden Stratospheric Warmings // *Bull. Amer. Met. Soc.* 2015. P. 1913–1928.
42. *Manney G., Lawrence Z., Santee M., Read W., Livesey N., Lambert A., Froidevaux L., Pumphrey H., Schwartz M.* A minor sudden stratospheric warming with a major impact: Transport and polar processing in the 2014/2015 Arctic winter // *Geophys. Res. Lett.* 2015. V. 42. P. 7808–7816.
43. *Hitchcock P., Shepherd T., Manney G.* Statistical Characterization of Arctic Polar-Night Jet Oscillation Events // *J. Climate.* 2013. V. 26. P. 2096–2116.
44. *Kodera K., Mukougawa H., Maury P., Ueda M., Claud C.* Absorbing and reflecting sudden stratospheric warming events and their relationship with tropospheric circulation // *J. Geophys. Res.: Atmos.* 2016. V. 121. P. 80–94.
45. *Colucci S., Ehrmann T.* Synoptic–dynamic climatology of the Aleutian high // *J. Atmos. Sci.* 2018. V. 75. P. 1271–1283.
46. *Thompson D.W., Wallace J.M.* Annular modes in the extratropical circulation. Part I: Month to month variability // *J. Climate.* 2000. V. 13. P. 1000–1016.
47. *Thompson D.W., Wallace J.M.* The Arctic Oscillation signature in wintertime geopotential height and temperature fields // *Geophys. Res. Lett.* 1998. V. 25. P. 1297–1300.
48. *Крыжов В.Н., Горелиц О.В.* Арктическая осциляция ее влияние на температуру и осадки в Северной Евразии в XX в. // *Метеорология и гидрология.* 2015. № 11. С. 5–19.
49. *Крыжов В.Н.* Климатические экстремумы зимы 2019/20 г. в Северной Евразии: вклады климатического тренда и межгодовой изменчивости, связанной с Арктической осцилляцией // *Метеорология и гидрология.* 2021. № 2. С. 5–16.
50. *Runde T., Dameris M., Garny H., Kinnison D.* Classification of stratospheric extreme events according to their downward propagation to the troposphere // *Geophys. Res. Lett.* 2016. V. 43. P. 6665–6672.
51. *Kretschmer M., Cohen J., Matthias V., Runge J., Coumou D.* The different stratospheric influence on cold-extremes in Eurasia and North America // *npj Climate Atmos. Sci.* 2018. V. 1. 44.
52. *Matthias V., Kretschmer M.* The Influence of Stratospheric Wave Reflection on North American Cold Spells // *Mon. Weather Rev.* 2020. V. 148. P. 1675–1690.

53. *Kodera K., Mukougawa H., Itoh S.* Tropospheric impact of reflected planetary waves from the stratosphere // *Geophys. Res. Lett.* 2008. V. 35. № 16. <https://doi.org/10.1029/2008GL034575>
54. *Варгин П.Н., Кирюшов Б.М.* Внезапное стратосферное потепление в Арктике в феврале 2018 г. и его влияние на тропосферу, мезосферу и озоновый слой // *Метеорология и гидрология.* 2019. № 2. С. 41–56.
55. *Зюляева Ю.А., Жадин Е.А.* Анализ трехмерных потоков Элиассена-Пальма в нижней стратосфере // *Метеорология и гидрология.* 2009. № 8. С. 5–14.
56. *Manney G., Lawrence Z., Santee M., Livesey N., Lambert A., Pitts M.* Polar processing in a split vortex: Arctic ozone loss in early winter 2012/2013 // *Atmos. Chem. Phys.* 2015. V. 15. P. 5381–5403.
57. *Варгин П.Н., Медведева И.В.* Исследование температурного и динамического режима внетропической атмосферы Северного полушария в период внезапного стратосферного потепления зимой 2012–2013 г. // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана.* 2015. Т. 51. № 1. С. 20–38.
58. *Nath D., Chen W., Zelin C., Pogoreltsev A., Wei K.* Dynamics of 2013 Sudden Stratospheric Warming event and its impact on cold weather over Eurasia: Role of planetary wave reflection // *Sci. Rep.* 2016. <https://doi.org/10.1038/srep24174>

## Arctic Stratosphere Dynamical Processes in the Winter of 2020–2021

**P. N. Vargin<sup>1, 3, \*</sup>, V. V. Guryanov<sup>2, \*\*</sup>, A. N. Lukyanov<sup>1, \*\*\*</sup>, and A. S. Vyzankin<sup>1, \*\*\*\*</sup>**

<sup>1</sup>*Central Aerological Observatory, Pervomayskaya str., 3, Dolgoprudny, Moscow region, 141707 Russia*

<sup>2</sup>*Kazan Federal University, Kremlevskaya str., 3, Kazan, 420008 Russia*

<sup>3</sup>*Obukhov Institute of atmospheric physics of the Russian Academy of Science, Pyzhyovskiy per., 3, Moscow, 119017 Russia*

\**e-mail: p\_vargin@mail.ru*

\*\**e-mail: vladimir.guryanov@kpfu.ru*

\*\*\**e-mail: lukyanov@caomsk.mipt.ru*

\*\*\*\**e-mail: vzvzvan@mail.ru*

Arctic stratosphere winter season 2020–2021 was characterized by weakened stratospheric polar vortex as a result of major Sudden Stratospheric Warming (SSW) event in early January. After the SSW event lasted about three weeks and accompanied by strengthening of the Aleutian High the lower stratosphere temperature inside the stratospheric polar vortex was higher than required for polar stratospheric clouds formation.

**Keywords:** Arctic stratosphere, planetary waves, sudden stratospheric warming, trajectory modeling