

УДК: 551.46: 551.510

ВЛИЯНИЕ ЮЖНОЙ ОСЦИЛЛЯЦИИ НА ДИНАМИКУ СТРАТОСФЕРЫ И ОЗОНОВЫЙ СЛОЙ АРКТИКИ

© 2019 г. А.Р. Яковлев, С.П. Смышляев

*Российский государственный гидрометеорологический университет
Россия, 192007 Санкт-Петербург, Воронежская ул., 79
E-mail: endrusj@rambler.ru*

Поступила в редакцию 16.07.2018 г.
После доработки 28.09.2018 г.

Воздействие Южной осцилляции на структуру и состав стратосферы Арктики анализируется с использованием данных реанализа о температуре поверхности океана, потенциальной завихренности, температуре воздуха, отношении смеси и общему содержанию озона за 1980–2016 гг. Показано, что явление Эль-Ниньо способствует увеличению неустойчивости стратосферного циркумполярного вихря, а также предшествует внезапным стратосферным потеплениям, что ведет к увеличению содержания озона в Арктике в зимне-весенний период.

Ключевые слова: Эль-Ниньо, Ла-Нинья, внезапные стратосферные потепления, стратосферный циркумполярный вихрь, озоновая дыра

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0002-351553198-113>

ВВЕДЕНИЕ

Взаимодействие атмосферы и океана влияет на физические и химические процессы в атмосфере. Эти процессы характеризуют обмен свойствами и преобразование энергии. Основным источником энергии для них является Солнце, которое нагревает верхний слой океана, приводя к появлению градиентов температуры и плотности, и, следовательно, к океанским течениям [1–3].

Наиболее значимым из этих течений является связанное с явлением Эль-Ниньо течение в восточной части тропической области Тихого океана, которое приводит к потеплению поверхности океана. Противоположная фаза Эль-Ниньо – это Ла-Нинья, которое приводит к охлаждению поверхности океана. Атмосферной составляющей Эль-Ниньо является Южная осцилляция, приводящая к различиям в атмосферном давлении между восточной и западной частями Тихого океана, что приводит к глубокой конвекции и повышению влажности [4].

Взаимодействие атмосферы и океана является предметом многих научных исследований [1, 2, 5–7], в ходе которых были разработаны различные модели для анализа и прогноза свя-

занных с этим процессов. В последнее время актуальной становится проблема влияния океана на стратосферу и полярные регионы [8–10].

Важным динамическим процессом, происходящим в полярной стратосфере, является циркумполярный вихрь, который оказывает существенное влияние на температуру и газовый состав стратосферы полярной области. Устойчивость циркумполярного вихря определяется стабильностью зонального воздушного потока, тогда как меридиональная составляющая потока приводит к неустойчивости вихря [11]. Численные эксперименты показали, что средние значения зональной скорости ветра в Арктике меньше, чем в Антарктике, тогда как межгодовые изменения, наоборот, больше [12]. Изменение условий на нижней границе стратосферы является достаточным для различия временной изменчивости среднего потока вокруг полюса. Планетарные волны являются одним из ключевых факторов существования циркумполярного вихря в северном полушарии. Устойчивость вихря также влияет на содержание озона и температуру: по теории, чем дольше существует циркумполярный вихрь, тем дольше будет существовать озоновая дыра и тем ниже будет температура в полярной стратосфере [13].

Температура нижней стратосферы полярной области является важным фактором снижения содержания озона. Холодный зимний сезон 1996–1997 гг., который был следствием пониженной волновой активности, привел к усилению разрушения озона за счет гетерогенной активации хлорных и бромных газов, а также к ослаблению планетарных волн. Теплый зимний сезон 1998–1999 гг., наоборот, характеризовался повышенной волновой активностью [12]. Температура во внутренней области стратосферного полярного вихря определяет объем стратосферных полярных облаков, от которых также зависит интенсивность разрушения озона. Ослабление планетарных волн может приводить к понижению температуры в полярной стратосфере и ослаблению переноса озона, что может приводить к нагреванию тропической тропопаузы [12, 14].

Изменения температуры поверхности океана (ТПО), приводя к меридиональному градиенту ТПО, могут оказывать существенное влияние на стратосферу [13]. Меридиональный градиент ТПО оказывает более сильное влияние на зональную циркуляцию, чем глобальная изменчивость ТПО. Значит, градиент ТПО оказывает сильное влияние на циркумполярный вихрь и содержание озона в северном полушарии. Также было высказано предположение, что снижение содержания озона может воздействовать на Эль-Ниньо – Южное колебание, которое вызывает перераспределение потоков тепла в океане и атмосфере, тогда как увеличение содержания озона может способствовать Ла-Нинья [15]. Это может приводить к переходу энергии поглощенного озоном ультрафиолетового излучения в океан, увеличивая его теплосодержание. Моделирование показало, что влияние Эль-Ниньо на приземный климат Европы осуществляется через стратосферу [28].

Целью данного исследования является изучение влияния температуры поверхности океана на процессы в арктической стратосфере (циркумполярный вихрь, изменения температуры и содержания озона). Для этого рассматривались периоды с декабря по март для наиболее показательных лет: 1996–1997, 1998–1999, 2009–2010, 2010–2011, 2014–2015, 2015–2016 гг.

В 1-м разделе статьи рассказывается об исходных данных и методах исследования, во 2-м – о полученных результатах, в 3-м разделе приведены выводы.

1. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДЫ РАБОТЫ

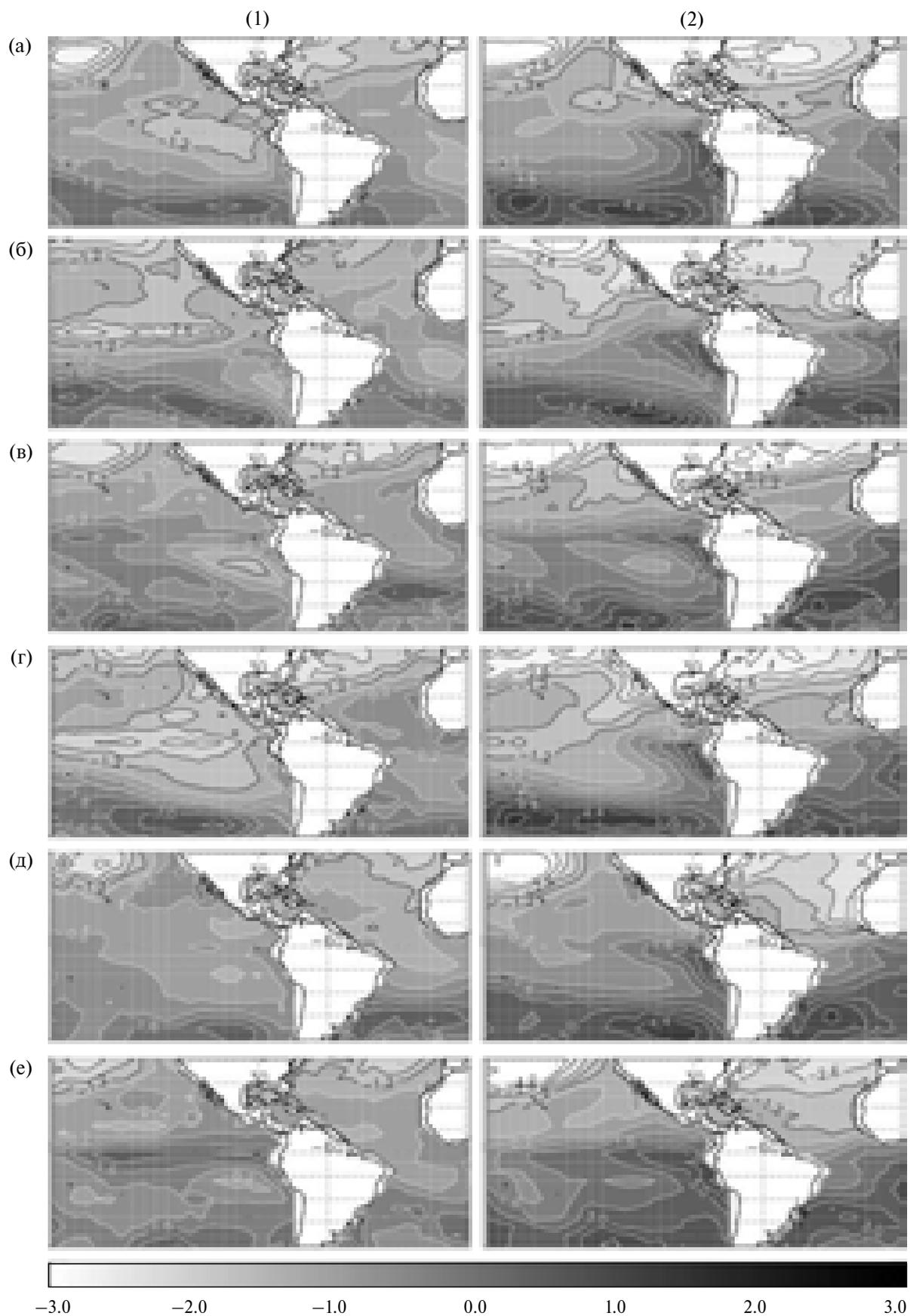
В работе использованы данные реанализов MERRA, ERA-Interim, ERA20Century и ERA5 о температуре воздуха, отношении смеси озона и потенциальной завихренности [16–17]. При этом MERRA содержит 25 уровней в вертикальном направлении, а в ERA-Interim, ERA20Century и ERA5 – 21 уровень. Использовались также данные об общем содержании озона из этих реанализов. Для изучения влияния океана на атмосферу использовались данные Met Office [18], ERA-Interim [17], ERA20Century до 2010 г. и данные ERA5 за 2010–2015 гг. [17] о ТПО.

Для анализа данных был выбран период с 1980 по 2016 гг., при этом использовались среднемесячные данные. Для 1997, 1999, 2010, 2011, 2015 и 2016 гг. были также использованы среднесуточные данные по потенциальной завихренности, температуре воздуха и отношению для озона.

Данные реанализа были приведены к сетке химико-климатической модели, разработанной в Институте вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН [19] и Российском государственном гидрометеорологическом университете [20], которая использовалась в предыдущих исследованиях [21]. Разрешение модельной сетки составляет $4^\circ \times 5^\circ$, модельная область простирается от 180° W до 180° E , от 88° S до 88° N и от поверхности земли до уровня 0.003 гПа (от 0 до 88 км) по вертикали (количество σ -уровней составляет 39).

Для анализа стратосферных процессов построены:

- полярные проекции потенциальной завихренности на поверхности с потенциальной температурой 550 К,
- полярные проекции температуры воздуха и отношения смеси озона на высоте 24.5 км (30 гПа) в северном полушарии;
- полярные проекции общего содержания озона в северном полушарии;
- проекции аномалий температуры поверхности океана;
- вертикальные профили годовых изменений потенциальной завихренности, температуры воздуха и отношения смеси озона в 1997, 1999, 2010, 2011, 2015 и 2016 гг. на широте 84° N .



2. ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

2.1. Анализ океанических процессов

Распределение аномалий ТПО по среднемесячным данным ERA-Interim представлено на рис. 1. Были выбраны годы, когда влияние Эль-Ниньо и Ла-Нинья было наиболее существенным: 1996–1997 и 1998–1999 гг. (ряды а и б на рисунке), так как на 1997–1998 гг. пришелся один из самых мощных Эль-Ниньо [22]. На рисунке представлены также 2009–2010 (ряд в, в эти годы тоже было Эль-Ниньо), 2010–2011 (ряд г, в этот период было Ла-Нинья), 2014–2015 и 2015–2016 гг. (ряды д и е, годы с Эль-Ниньо). Аномалии ТПО представлены за декабрь–январь (столбец 1) и февраль–март (столбец 2).

По рисунку видно сильное потепление в тропической части Тихого океана в годы Эль-Ниньо (2010, 2015 и 2016 гг. – ряды в, д и е). Также видны признаки потепления в феврале–марте 1997 г. (рис. 1а–(2)). При этом аномалии ТПО в этом регионе превышали 1 К, что указывает на превышение ТПО значения 300 К (27 °С). На рисунках наблюдается область наибольших аномалий ТПО (более 2–3 К) в южной части Тихого океана. В годы Эль-Ниньо (2010, 2015 и 2016 гг.) эта область расширяется на север за экватор, а аномалии ТПО превышают 3 К. Причем сильнее всего потепление выражено в 2015 и 2016 гг. (в эти годы в районе экватора в Тихом океане наблюдалась область повышенных аномалий ТПО). В 2009–2010 гг., с декабря по март, видно, что теплая область Тихого океана сдвигается на восток к западному побережью Америки, что указывает на Эль-Ниньо. С декабря по март в 2015–2016 гг. эта область существует непрерывно в течение всего этого периода, что указывает на то, что Эль-Ниньо в этот период было довольно мощным. В период с декабря по март 2014–2015 гг. развитие Эль-Ниньо более ярко выражено, чем в 2009–2010 гг. В периоды с декабря по март 1998–1999 гг. (ряд б) и 2010–2011 гг. (ряд г) в экваториальной части Тихого океана наблюдается область низких аномалий ТПО (менее –1 К). Это означает, что в эти годы Эль-Ниньо сменилось противоположной фазой – Ла-Нинья, что привело к похолоданию в восточной части тропической области Тихого океана. Анализ данных ТПО Met Office,

ERA20Century и ERA5 дает аналогичные результаты.

Таким образом, можно прийти к выводу, что Эль-Ниньо было в 1997, 2010, 2015 и 2016 гг., а в 1999 и 2011 гг. было Ла-Нинья.

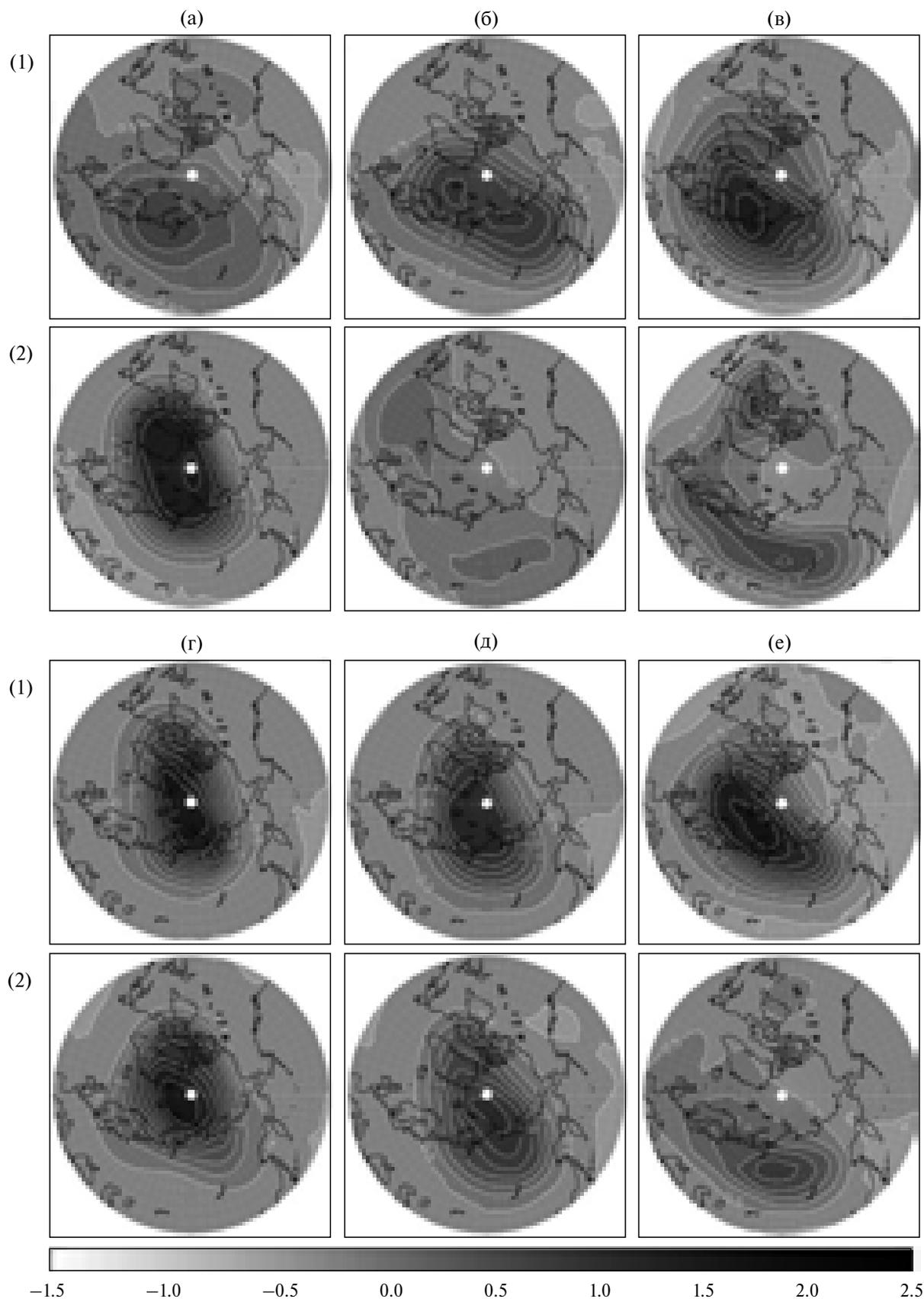
2.2. Циркумполярный вихрь и влияние на него океана

Стратосферный циркумполярный вихрь (ЦПВ) – область в диапазоне высот от нижней стратосферы до мезосферы с сильным западным ветром, максимальным в окрестности 60°N, и пониженными значениями давления. Согласно [11–14], устойчивый ЦПВ приводит к понижению температуры в стратосфере и уменьшению концентрации озона. В конце зимы устойчивый ЦПВ приводит к усиленному разрушению озона. В годы Эль-Ниньо наблюдается более сильный поток волновой активности из тропосферы в полярную стратосферу, которая ослабляет ЦПВ [29].

На рис. 2 показаны полярные проекции потенциальной завихренности (ПЗ) на изентропической поверхности с потенциальной температурой 550 К в северном полушарии по среднемесячным данным ERA-Interim. Выбраны те же годы, что и для ТПО: 1996–1997 и 1998–1999 (столбцы а и б), 2009–2010 и 2010–2011 (столбцы в и г), 2014–2015 и 2015–2016 гг. (столбцы д и е). Проекции ПЗ представлены для следующих месяцев: декабрь и февраль 1996–1997 гг., январь и февраль 2010 г. и февраль и март 1999, 2011, 2015 и 2016 гг.

Видно, что ЦПВ наиболее устойчив в 1997, 2011 и 2015 гг. (столбцы а, г и д). При этом в 1997 и 2011 гг. ЦПВ формируется с в период с декабря по февраль: значения ПЗ над Арктикой увеличиваются с $0.4–0.6 \times 10^{-4} \frac{\text{К} \cdot \text{м}^2}{\text{кг} \cdot \text{с}}$ до более чем $1.3–1.5 \times 10^{-4} \frac{\text{К} \cdot \text{м}^2}{\text{кг} \cdot \text{с}}$, тогда как значение ПЗ в марте ($1.5 \times 10^{-4} \frac{\text{К} \cdot \text{м}^2}{\text{кг} \cdot \text{с}}$) близко к февральскому значению. В 2015 г. ЦПВ также устойчив, но ПЗ не превышает значения $1.0 \times 10^{-4} \frac{\text{К} \cdot \text{м}^2}{\text{кг} \cdot \text{с}}$. В 1999 г. (столбец б) ЦПВ наиболее неустойчив:

Рис. 1. Распределение средних за два месяца аномалий температуры поверхности океана в К в области 40° S – 40° N, 180° W – 0° по данным ERA-Interim за декабрь–январь (столбец 1) и февраль–март (столбец 2) 1996–1997 (ряд а), 1998–1999 (ряд б), 2009–2010 (ряд в), 2010–2011 (ряд г), 2014–2015 (ряд д), 2015–2016 гг. (ряд е).



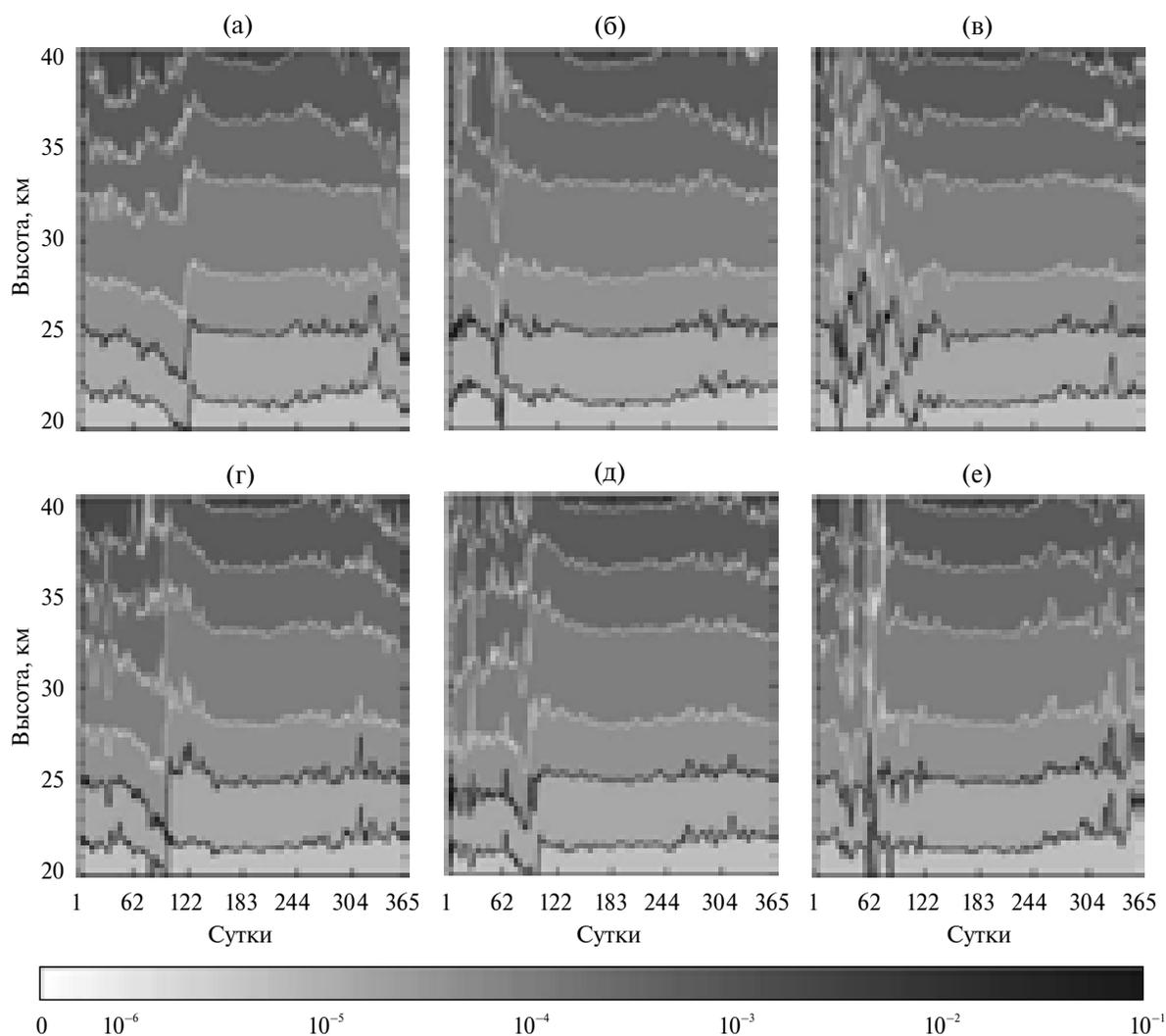


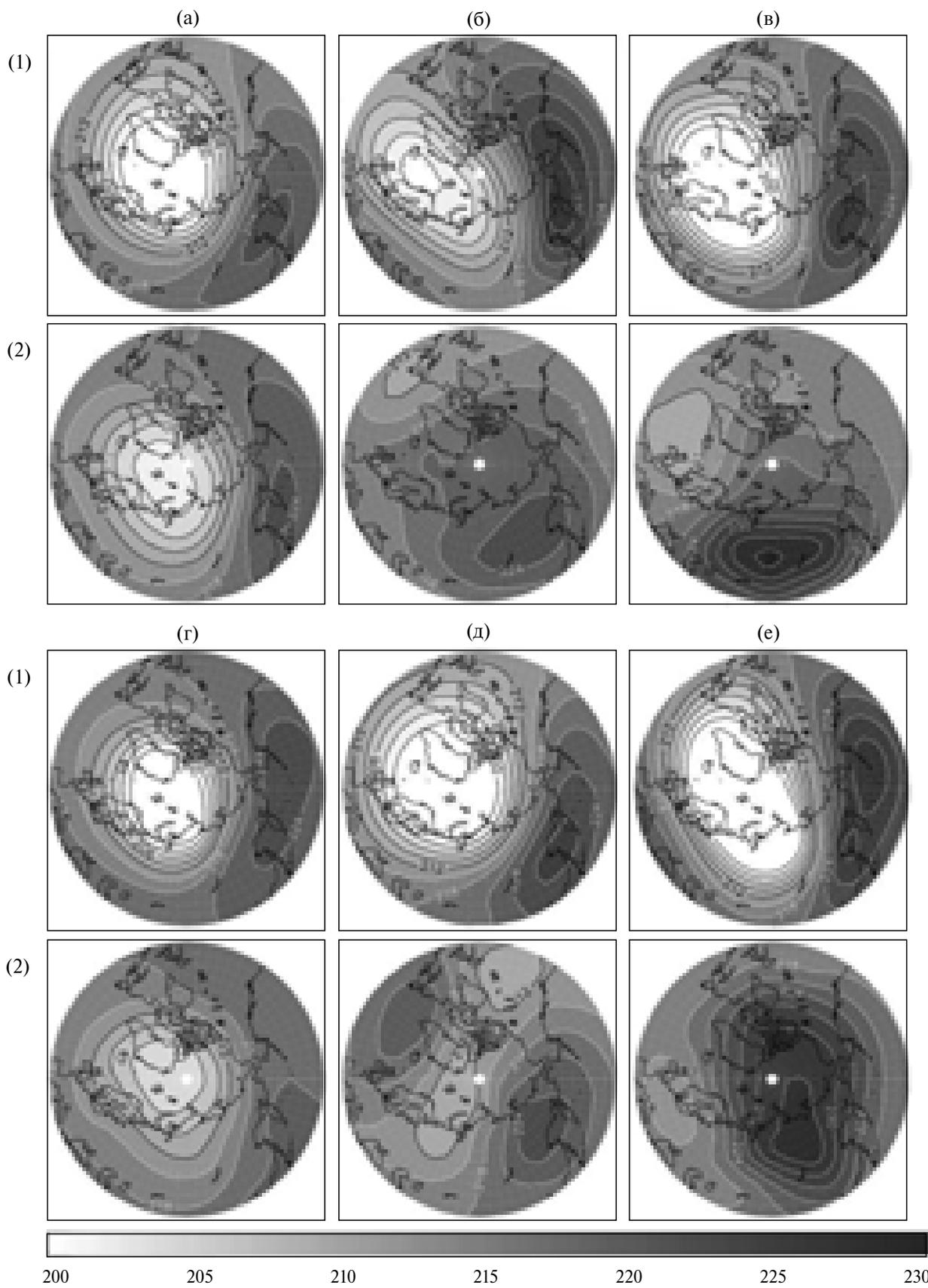
Рис. 3. Вертикальные годовые профили потенциальной завихренности в единицах $\frac{\text{К} \cdot \text{м}^2}{\text{кг} \cdot \text{с}}$ по среднесуточным данным ERA-Interim на широте 84° N в 1997 (а), 1999 (б), 2010 (в), 2011 (г), 2015 (д) и 2016 гг. (е).

если в декабре 1998 г. значение ПЗ над Арктикой было около $1.0 \times 10^{-4} \frac{\text{К} \cdot \text{м}^2}{\text{кг} \cdot \text{с}}$, то в январе оно уменьшилось до $0.5 \times 10^{-4} \frac{\text{К} \cdot \text{м}^2}{\text{кг} \cdot \text{с}}$, затем в феврале (рис. 2б–(1)) оно снова увеличилось до $0.9 \times 10^{-4} \frac{\text{К} \cdot \text{м}^2}{\text{кг} \cdot \text{с}}$, после чего в марте (рис. 2б–(2)) ЦПВ практически распался. В 2010 и 2016 гг. (столбцы в и е) ЦПВ формировался

с декабря по январь (со значениями ПВ до $1.0 \times 10^{-4} \frac{\text{К} \cdot \text{м}^2}{\text{кг} \cdot \text{с}}$), однако в марте ЦПВ начал распадаться.

Были также построены вертикальные среднезональные годовые профили ПЗ по среднесуточным данным ERA-Interim, которые приведены на рис. 3. При этом на рис. 3а, б, в, г, д и е показаны профили для 1997, 1999, 2010, 2011, 2015 и 2016 гг. на широте 84° N.

Рис. 2. Среднемесячное распределение потенциальной завихренности в северном полушарии в единицах $10^4 \frac{\text{К} \cdot \text{м}^2}{\text{кг} \cdot \text{с}}$ в области 40° N – 90° N на высоте 24.5 км (30 гПа) по данным ERA-Interim за декабрь и февраль 1996–1997 гг. (столбец а), февраль и март 1999 г. (столбец б), январь и февраль 2010 г. (столбец в), февраль и март 2011 г. (столбец г), 2015 г. (ряд д) и 2016 г. (ряд е).



Как видно по этим рисункам, ЦПВ существует в течение того периода, когда значения ПЗ испытывают сильные флуктуации, тогда как при малых флуктуациях ПЗ ЦПВ отсутствует. Наиболее устойчивый ЦПВ был в 1997 г. (рис. 3а), и он существовал с января по апрель этого года. Устойчивые ЦПВ характерны и для 2011 (рис. 3г) и 2015 гг. (рис. 3д), но они существовали до второй половины марта. В 2010 (рис. 3в) и 2016 гг. (рис. 3е) ЦПВ также распался в течение марта. В 1999 г. (рис. 3б) ЦПВ существовал только до середины февраля, что означает, что в этом году он был неустойчив. Для широты 60°N , где находится Санкт-Петербург, данные реанализа дают аналогичные результаты.

Анализ данных MERRA, ERA20Century и ERA5 дал похожие результаты.

Таким образом, можно прийти к выводу, что наиболее устойчивые ЦПВ были в годы перед началом мощного Эль-Ниньо: в 1997 и 2015 гг., а также в 2011 г., когда было Ла-Нинья. В 1999 г., когда начиналось Ла-Нинья после мощного Эль-Ниньо 1997–1998 гг., ЦПВ был наиболее неустойчив. В год слабого Эль-Ниньо (2010 г.), а также в год развитого Эль-Ниньо (2016 г.) ЦПВ был довольно устойчив, но в марте начинал распадаться. Это означает, что устойчивость ЦПВ может быть признаком начала Эль-Ниньо, тогда как неустойчивость ЦПВ — его следствием.

2.3. Стратосферная температура и влияние на нее океана

Температура в стратосфере зависит от устойчивости ЦПВ; она влияет на состав атмосферы, а значит, и на содержание озона [12, 23].

На рис. 4 показаны полярные проекции температуры воздуха на высоте 24.5 км (30 гПа) над северным полушарием по среднемесячным данным ERA-Interim. При этом выбраны те же годы, что и при анализе ТПО и ПЗ: 1996–1997 и 1998–1999 (столбцы а и б), 2009–2010 и 2010–2011 (столбцы в и г), 2014–2015 и 2015–2016 гг. (столбцы д и е). Проекция температуры воздуха представлены для следующих месяцев: январь и февраль 2010 г., январь и март

2016 г., декабрь и январь 2014–2015 гг., и февраль и март 1997, 1999, 2011 гг.

Как видно, полярная область низких температур со значениями менее 200 К была наиболее устойчивой в 1997 и 2011 гг. (столбцы а и г), что соответствует наиболее устойчивому в эти годы ЦПВ (см. рис. 2, столбцы а и г). При этом область низкой температуры в эти годы максимальна с декабря по февраль (температура менее 200 К над Северным Ледовитым океаном), а затем уменьшается и остается только над Северным полюсом. В 2015 г. область низкой температуры менее устойчива: несмотря на то, что в декабре 2014 г. (рис. 4д–(1)) зона с температурой менее 200 К была обширной, в январе 2015 г. (рис. 4д–(2)) она практически исчезла, хотя в феврале появилась вновь. В 2010 и 2016 гг. (столбцы в и е) области низкой температуры со значениями менее 200 К существовали только в декабре и январе, после чего исчезли (на их месте появились области высокой температуры со значениями более 230 К). В 1999 г. (год наиболее неустойчивого ЦПВ, столбец б) существовала довольно устойчивая область низкой температуры со значениями 205–210 К, хотя в марте (рис. 4б–(2)) она распалась.

Были также построены вертикальные среднезональные годовые профили температуры воздуха по среднесуточным данным ERA-Interim, которые приведены на рис. 5. При этом на рис. 5а, б, в, г, д и е показаны профили для 1997, 1999, 2010, 2011, 2015 и 2016 гг. на широте 84°N .

Низкие значения температуры (менее 200 К) наблюдаются в период с января по март и с октября по декабрь в нижней стратосфере (до 35 км). При этом высокие значения температуры (более 260 К) наблюдаются в период с мая по сентябрь на высотах выше 30 км, что соответствует сезонному циклу. Однако периоды с низкой температурой прерываются внезапными стратосферными потеплениями (ВСП), при которых температура может подниматься на несколько десятков градусов выше климатической нормы [23, 24]. В северном полушарии ВСП наблюдаются почти каждую зиму из-за волновой активности [24–26]. Эти ВСП могут быть вызваны явлением Эль-Ниньо и квазидвухлетним колебанием скорости зонального ветра [23–26]

Рис. 4. Среднемесячное распределение температуры воздуха в северном полушарии в K в области $40^{\circ}\text{N} - 90^{\circ}\text{N}$ на высоте 24.5 км (30 гПа) по данным ERA Interim за февраль и март 1997 (столбец а) и 1999 гг. (столбец б), январь и февраль 2010 г. (столбец в), февраль и март 2011 г. (столбец г), декабрь и январь 2014–2015 гг. (столбец д), январь и март 2016 г. (столбец е).

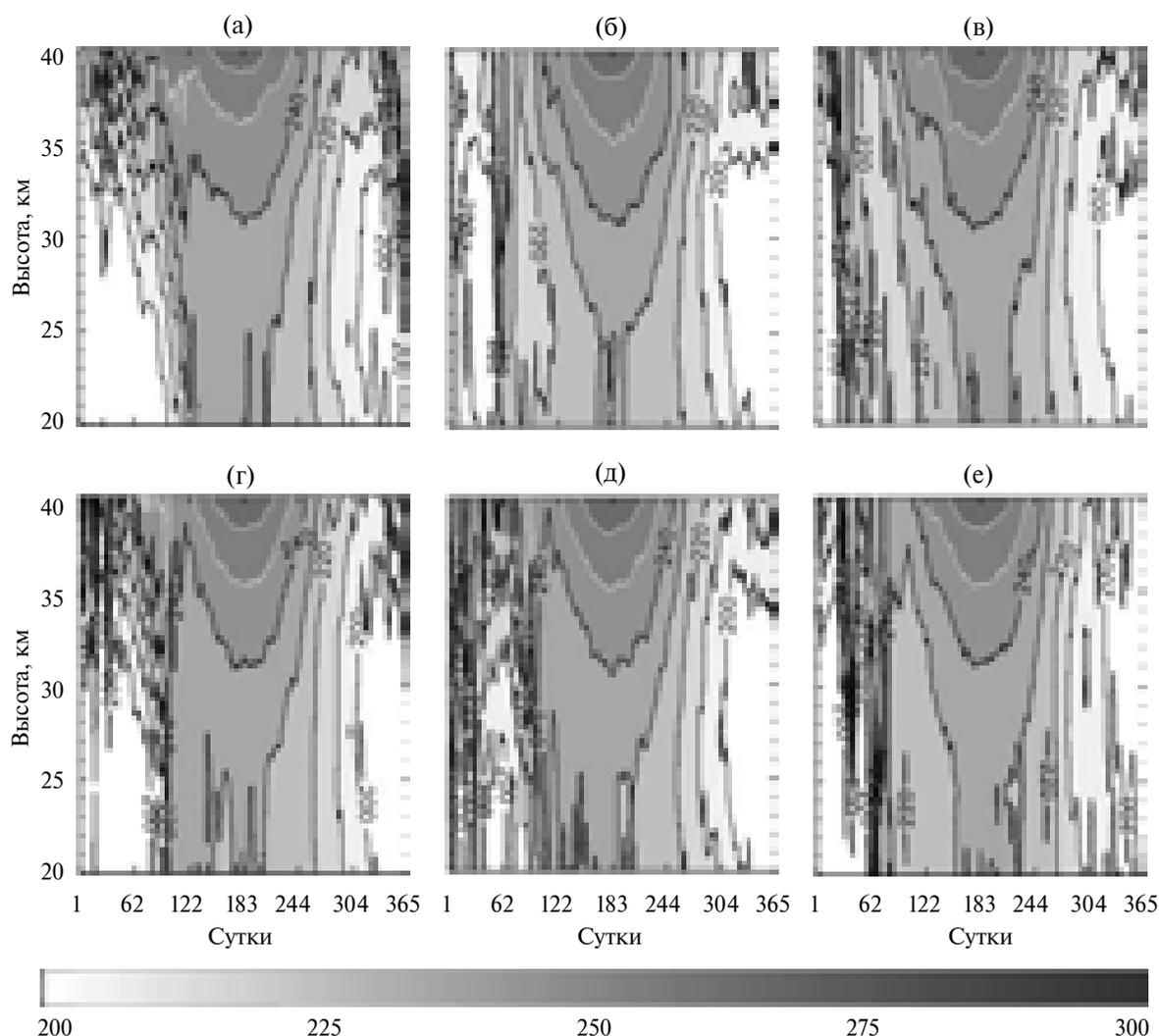


Рис. 5. Вертикальные годовые профили температуры воздуха в К по среднесуточным данным ERA-Interim на широте 84° N в 1997 (а), 1999 (б), 2010 (в), 2011 (г), 2015 (д) и 2016 гг. (е).

и могут влиять на устойчивость ЦПВ. Анализ 53 сильных ВСП, оказавших влияние на циркуляцию тропосферы, показал, что вероятность их возникновения в годы теплой и холодной фазы Эль-Ниньо почти одинаковая [30].

Согласно рис. 5, ВСП практически отсутствуют в полярных широтах в 1997 (рис. 5а) и 2011 гг. (рис. 5г): в период с января по апрель существует устойчивая зона холода с температурой менее 200 К. На широте 60°N в эти годы ВСП в это время происходили часто, но не влияли на устойчивость ЦПВ, так как они происходили за пределами полярной области. Чаще всего ВСП наблюдались в полярных широтах с января по апрель в 2010 (рис. 5в) и 2015 гг. (рис. 5д) годы, когда температура периодически поднималась до 230 К. Эти ВСП привели к неустойчивости области низкой температуры над северным полюсом в эти годы. С января по март

2016 г. в полярных широтах наблюдалась область низкой температуры (рис. 5е), после чего отмечена серия ВСП. Аналогичная картина была в 1999 г. (рис. 5б).

Анализ данных MERRA, ERA20Century и ERA5 дает аналогичные результаты по температуре воздуха и ВСП.

Таким образом, ЦПВ и связанная с ним область низкой температуры в 1997 и 2011 гг. были наиболее устойчивыми. При устойчивом ЦПВ в 2015 г. серия ВСП привела к неустойчивости области низкой температуры, при этом ЦПВ также потерял устойчивость. В 1999 г. при наиболее неустойчивом ЦПВ ситуация с ВСП была схожа с 2016 г. Значит, ВСП могут быть следствием Эль-Ниньо, тогда как отсутствие ВСП может соответствовать Ла-Нинья или отсутствию Южного колебания в эти годы.

2.4. Озоновый слой и влияние на него океана

Состояние озонового слоя зависит от целого ряда факторов, но ключевое значение имеет устойчивость ЦПВ и очаг холода, особенно над полярной областью. Устойчивый ЦПВ приводит к появлению устойчивой области низкой температуры в полярном регионе, что, в свою очередь может приводить к появлению полярных стратосферных облаков, гетерогенных процессов на их поверхности и, как следствие, к снижению концентрации озона [12, 15, 26, 27].

На рис. 6 показаны полярные проекции отношения смеси озона на высоте 24.5 км (30 гПа) над северным полушарием по среднемесячным данным ERA-Interim. Выбраны те же годы, что и при анализе других данных: 1996–1997 и 1998–1999 (столбцы а и б), 2009–2010 и 2010–2011 гг. (столбцы в и г), 2014–2015 и 2015–2016 гг. (столбцы д и е). Проекция отношения смеси озона представлены для января и февраля 1997 и 2010 гг., декабря и января 1998–1999 гг., февраля и марта 2011 г., декабря и февраля 2014–2015 гг. и января и марта 2016 г.

Как видно на рисунке, в 1997 г. (столбец а) над северным полюсом наблюдалась устойчивая зона низкого отношения смеси озона (существенно ниже среднеголетних значений) со значениями до $4 \times 10^{-6} \frac{\text{кг}}{\text{кг}}$ (2.4 млн^{-1}), что соответствует устойчивому ЦПВ и области низкой температуры, хотя в марте это значение увеличивается до $7 \times 10^{-6} \frac{\text{кг}}{\text{кг}}$ (4.2 млн^{-1}). Менее выраженное сокращение содержания озона ($6-7 \times 10^{-6} \frac{\text{кг}}{\text{кг}}$, или $3.6-4.2 \text{ млн}^{-1}$) было в 2011 г. (столбец г), для этого года также характерны устойчивые ЦПВ и область низкой температуры, при этом в марте началось существенное сокращение содержания озона, которое обусловлено химическими процессами [11]. В 2010 (столбец в), 2015 (столбец д) и 2016 гг. (столбец е) существенное уменьшение содержания озона (около $6 \times 10^{-6} \frac{\text{кг}}{\text{кг}}$ или 3.6 млн^{-1}) наблюдалось в декабре и январе, но затем содержание озона началось стремительно увеличиваться, (до отношения смеси не менее $8 \times 10^{-6} \frac{\text{кг}}{\text{кг}}$ или 4.8 млн^{-1}), что могло быть связано с серией ВСП в эти годы. В 1999 г. (столбец б), когда ЦПВ и об-

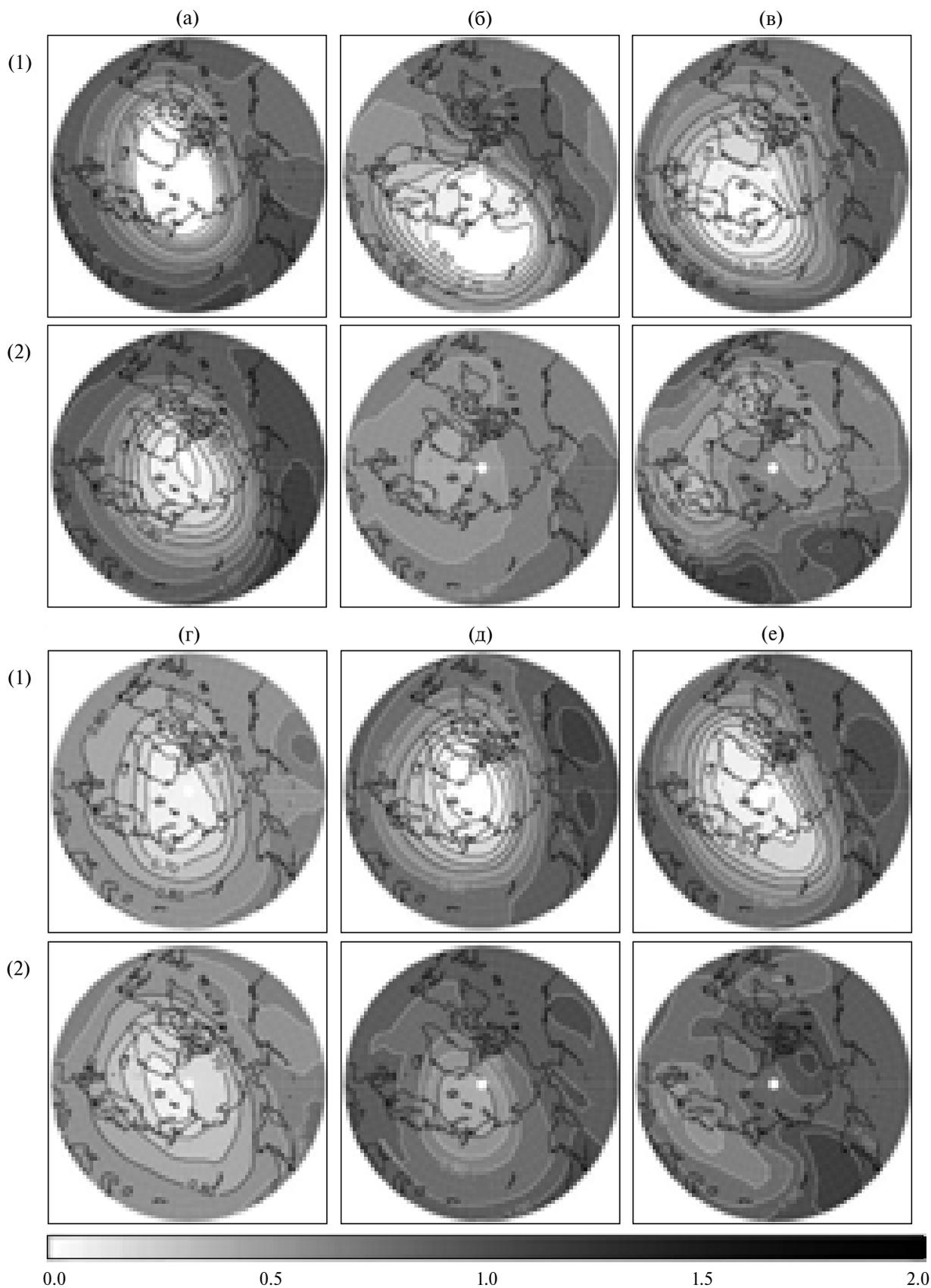
ласть низкой температуры были наиболее неустойчивы, произошло некоторое сокращение содержания озона до значений отношения смеси $\sim 8 \times 10^{-6} \frac{\text{кг}}{\text{кг}}$ (4.8 млн^{-1}), хотя в декабре 1998 г. (рис. 6б–(1)) наблюдались значения $\sim 6-7 \times 10^{-6} \frac{\text{кг}}{\text{кг}}$ ($3.6-4.2 \text{ млн}^{-1}$).

Также были построены вертикальные среднезональные годовые профили отношения смеси озона по среднесуточным данным ERA-Interim. На рис. 7а, б, в, г, д и е показаны профили для 1997, 1999, 2010, 2011, 2015 и 2016 гг. на широте 84°N .

Как видно по этим рисункам, низкие значения отношения смеси озона ($4-6 \times 10^{-6} \frac{\text{кг}}{\text{кг}}$, $2.4-3.6 \text{ млн}^{-1}$) наблюдались на высотах 25–30 км в период с января по апрель 1997 (рис. 7а), и 2011 гг. (рис. 7г, хотя, наряду с этим, отмечены значения не менее $6-8 \times 10^{-6} \frac{\text{кг}}{\text{кг}}$ ($3.6-4.8 \text{ млн}^{-1}$), но в марте–апреле 2011 г. наблюдалось существенное снижение содержания озона. В 2010 и 2015 гг. (рис. 7в и д) уменьшение содержания озона до $6-8 \times 10^{-6} \frac{\text{кг}}{\text{кг}}$ ($3.6-4.8 \text{ млн}^{-1}$) происходило только до февраля, а в 2016 г. (рис. 7е) – до марта. В 1999 г. (рис. 7б) отношение смеси в это время не опускалось ниже $8 \times 10^{-6} \frac{\text{кг}}{\text{кг}}$ (4.8 млн^{-1}). При этом во все годы наблюдается пониженное содержание озона в сентябре–октябре со значениями менее $5 \times 10^{-6} \frac{\text{кг}}{\text{кг}}$ (3.0 млн^{-1}), а в декабре 1999 г. – со значениями менее $3 \times 10^{-6} \frac{\text{кг}}{\text{кг}}$ (1.8 млн^{-1}).

Анализ данных ERA20Century и ERA5 дает аналогичные результаты по отношению смеси озона. Анализ данных MERRA показывает устойчивое сокращение содержания озона в 1997 г. до конца марта, но в остальном результаты анализа аналогичны результатам анализа данных ERA Interim.

Таким образом, можно прийти к выводу, что наиболее устойчивое сокращение содержания озона было в 1997 г., когда были наиболее устойчивы ЦПВ и область низкой температуры. Уменьшение содержания озона в 2011 г. менее выражено в январе–феврале, но более выражено в марте. В 2010, 2015 и 2016 гг. содержание озона стремительно увеличивалось в февра-



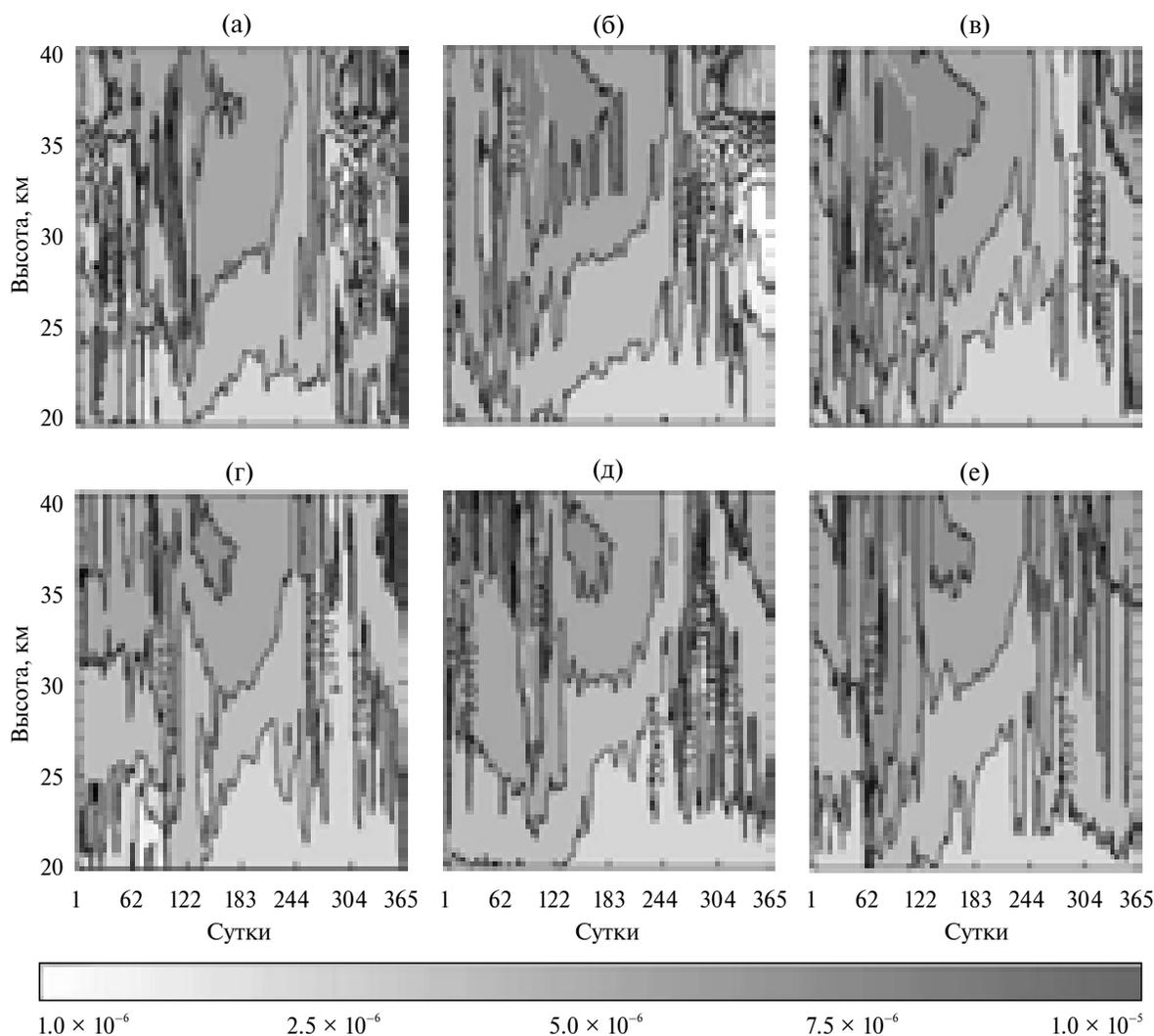


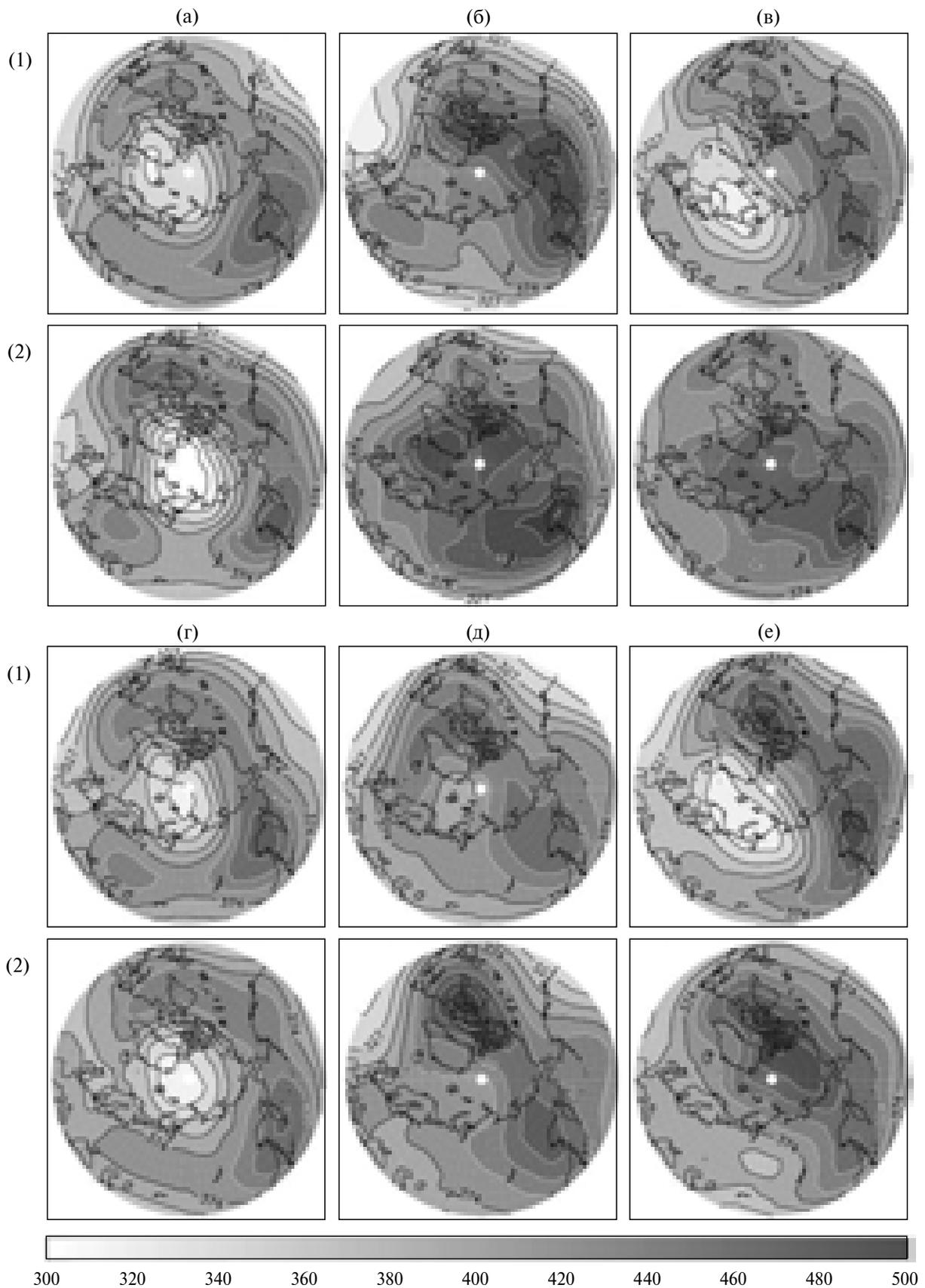
Рис. 7. Вертикальные годовые профили отношения смеси озона в единицах $\frac{\text{кг}}{\text{кг}}$ по среднесуточным данным ERA-Interim на широте 84° N в 1997 (а), 1999 (б), 2010 (в), 2011 (г), 2015 (д) и 2016 гг. (е).

ле–марте, что может быть обусловлено серией ВСП. В 1999 г. содержание озона практически не уменьшалось, что может быть обусловлено неустойчивым ЦПВ. Это указывает на то, что Эль-Ниньо может приводить к увеличению содержания озона, поскольку, как показано выше, может способствовать ВСП. Значит, отсутствие уменьшения содержания озона может быть указанием на влияние Эль-Ниньо.

2.5. Общее содержание озона и влияние на него океана

Общее содержание озона определяется количеством молекул озона во всей толще атмосферы. Оно также зависит от потоков тепла в океане, которые могут быть связаны с Эль-Ниньо и Ла-Нинья с их влиянием на общую циркуляцию атмосферы и устойчивость циркумполярного вихря [15, 26, 27].

Рис. 6. Среднемесячное распределение отношения смеси озона в северном полушарии в единицах $10^5 \frac{\text{кг}}{\text{кг}}$ в области 40° N – 90° N на высоте 24.5 км (30 гПа) по данным ERA Interim за февраль и март 1997 г. (столбец а), декабрь и январь 1998–1999 гг. (столбец б), январь и февраль 2010 г. (столбец в), февраль и март 2011 г. (столбец г), декабрь и февраль 2014–2015 гг. (столбец д), январь и март 2016 г. (столбец е).



На рис. 8 показаны полярные проекции общего содержания озона над северным полушарием по среднемесячным данным ERA-Interim. Выбраны те же годы, что и при анализе других данных: 1996–1997 и 1998–1999 (столбцы а и б), 2009–2010 и 2010–2011 (столбцы в и г), 2014–2015 и 2015–2016 гг. (столбцы д и е). Проекция общего содержания озона представлены для января и февраля 2010 и 2015 гг. и февраля и марта 1997, 1999, 2011 и 2016 гг.

В 1997 и 2011 г. (столбцы а и г) в районе северного полюса наблюдалась область наименьших значений содержания озона (менее 280 е. Д.), которая появилась в феврале–марте, что соответствует существованию в эти годы наиболее устойчивых ЦПВ, области низкой температуры и уменьшению содержания озона. При этом содержание озона вокруг этой области превышает 400 е. Д. В 2010 и 2015 гг. (столбцы в и д) область со значениями содержания озона менее 280 е. Д. на северном полюсе существовала с декабря по январь, а в феврале содержание озона увеличилось до 444 е. Д. В 2016 г. (столбец е) была аналогичная ситуация, но увеличение содержания озона произошло только в марте (рис. 8е–(2)). Это могло быть следствием серий ВСП в эти годы. В 1999 г. (столбец б) над Арктикой существовала область повышенного содержания озона (более 444 е. Д., над Скандинавией и севером Канады – до 460 е. Д.), и уменьшения озона не было, что могло быть связано с наиболее неустойчивым ЦПВ в этот год.

Таким образом, можно прийти к выводу, что общее содержание озона зависит от устойчивости ЦПВ и области низкой температуры в стратосфере. В 1997 и 2011 гг. наблюдалось снижение содержания озона в феврале, тогда как в 2010, 2015 и 2016 гг. в это время было его повышение. В 1999 г. содержание озона было высоким. Поэтому можно предположить, что Эль-Ниньо может приводить к сериям ВСП и повышению общего содержания озона, тогда как Ла-Нинья – к снижению общего содержания озона.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненный анализ данных ERA-Interim, MERRA, ERA20Century и ERA5 о ТПО, температуре воздуха, потенциальной завихренности,

отношения смеси и общего содержания озона за период с 1980 по 2016 гг. позволяет сделать следующие выводы:

1. Явление Эль-Ниньо было в 1997, 2010, 2015 и 2016 гг., а в 1999 и 2011 гг. – Ла-Нинья. ТПО в 1997, 2010, 2015 и 2016 гг. было выше 27°C во всем тропическом регионе Тихого океана, тогда как в 1999 и в 2011 гг. – только в его западной части.

2. Устойчивый ЦПВ, как правило, предшествует Эль-Ниньо, а неустойчивый может быть его следствием. ЦПВ в 1997 г. был наиболее устойчивым, при этом Эль-Ниньо 1997–1998 гг. было очень мощным. ЦПВ в 1999 г., после этого Эль-Ниньо, был наиболее неустойчивым.

3. Последствием Эль-Ниньо могут быть ВСП, которые приводят к неустойчивости связанной с ЦПВ области низкой температуры (менее 200 К). В годы с Эль-Ниньо (2010, 2015 и 2016 гг.), а также после Эль-Ниньо (1999 г.) наблюдались серии ВСП, которые вызвали неустойчивость очага холода.

4. Эль-Ниньо может приводить к увеличению содержания озона, что видно по 2010, 2015 и 2016 гг., когда зона низкого содержания озона после февраля начинает быстро уменьшаться (отношение смеси увеличивается с 3.6 по 4.8 млн⁻¹).

5. Эль-Ниньо может приводить и к увеличению общего содержания озона над северным полюсом, что видно по 2010, 2015 и 2016 гг. (содержание озона увеличивается с 280 по 420–444 е. Д. в течение февраля–марта).

Таким образом, Южная осцилляция оказывает глобальное влияние на атмосферу, вызывая неустойчивость ЦПВ через усиление распространения волновой активности из тропосферы в стратосферу, которое приводит к возникновению ВСП, и приводя к "заполнению" области низкого содержания озона и увеличению общего содержания озона.

Выводы работы основаны на данных реанализа, охватывающих период с 1980 по 2016 гг., в течение которого наблюдалось лишь несколько сильных явлений Эль-Ниньо – Южное колебание. В связи с этим использование данных климатического моделирования, имеющих как более длинные ряды, так и возможность исполь-

Рис. 8. Среднемесячное распределение общего содержания озона в северном полушарии в единицах $10^5 \frac{\text{кг}}{\text{кг}}$ в области 40° N – 90° N по данным ERA-Interim за февраль и март 1997 (ряд а) и 1999 гг. (ряд б), январь и февраль 2010 г. (ряд в), февраль и март 2011 г. (ряд г), январь и февраль 2015 г. (ряд д), февраль и март 2016 г. (ряд е).

зования нескольких реализаций, например, для современного климата может улучшить и уточнить полученные в настоящей работе оценки атмосферных параметров.

Источник финансирования. Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства образования и науки Российской Федерации (проект 5.6493.2017/8.9). Анализ изменчивости полярных процессов выполнен в рамках проекта 17-05-01277-а Российского фонда фундаментальных исследований. Изменение содержания озона оценивалось в рамках проекта РФФИ 18-05-01050.

Благодарности. Авторы выражают благодарность анонимному рецензенту за внимание к их статье и полезные замечания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ариэль Н.З., Строкина Л.А. Динамические характеристики взаимодействия атмосферы с поверхностью Мирового океана. Л.: Гидрометиздат, 1986. 48 с.
2. Бендик А.Б., Яковлев В.Н. О сближении подходов к пониманию феномена Эль-Ниньо – Ла-Нинья // Вестник Российского государственного университета им. И. Канта. 2010. Вып. 1. С. 57–64.
3. Лаппо С.С., Гулев С.К., Рождественский А.Е. Крупномасштабное тепловое взаимодействие в системе океан-атмосфера и энергоактивные области Мирового океана. Л.: Гидрометиздат, 1990.
4. Arnaud Czaja Ocean-atmosphere coupling in midlatitudes: does it invigorate or damp the storm track? // ECMWF Seminar on Seasonal Prediction, 3–7 September 2012. P. 35–46.
5. Доронин Ю.П. Влияние ледяного покрова на теплообмен атмосферы с океаном // Проблемы Арктики и Антарктики. 1974. № 43–44. С. 52–59.
6. Taylor K.E., Williamson D., Zwiers F. The sea surface temperature and sea-ice concentration boundary conditions for AMIP II simulations. Program for climate model diagnosis and intercomparison. University of California, Lawrence Livermore National Laboratory, 2000, September.
7. Taylor K., Williamson D., Zwiers F. The sea surface temperature and sea-ice concentration boundary conditions for AMIP II simulations // PCMDI Report. № 60. 2000, September.
8. Жадин Е.А. Межгодовые вариации озона над Европой и аномалии температуры океана в Атлантике // Метеорология и Гидрология. 1992. № 7. С. 22–26.
9. Жадин Е.А. Долгопериодная цикличность температуры поверхности океана, температуры нижней стратосферы и озона в умеренных широтах // Метеорология и Гидрология. 1993. № 5. С. 52–59.
10. Жадин Е.А. Арктическое колебание и межгодовые вариации температуры поверхности Атлантического и Тихого океанов // Метеорология и Гидрология. 2001. № 8. С. 28–40.
11. Смышляев С.П., Погорельцев А.И., Галин В.Я. и др. Влияние волновой активности на газовый состав стратосферы полярных районов // Геомагнетизм и аэронавигация. 2016. Т. 56 № 1. С. 102–116.
12. Newman Paul A., Nash Eric R., Rosenfield Joan E. What controls the temperature of the Arctic stratosphere during the spring? // J. Geoph. Res. 2001. V. 106. № D17. P. 19999–20010.
13. Dingzhu Hu, Wenshou Tian, Fei Xie, Jianchuan Shu and other. Effects of meridional sea surface temperature changes on stratospheric temperature and circulation // Advances in atmospheric science. 2014. V. 31. July. P. 888–900.
14. Chipperfield M.P., Jones R.L. Relative influences of atmospheric chemistry and transport on Arctic ozone trends. Nature, 1999. V. 400. P. 551–554.
15. Manatsa D., Mukwada G. A connection from stratospheric ozone to el niño-southern oscillation // Scientific reports. 7. 5558. 2017.
16. Nasa merra [Electronic resource]. Ncar climate data guide. Mode of access: <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/nasa-merra>.
17. Era-interim [Electronic resource] / ECMWF mode of access: <http://www.ecmwf.int/en/research/climate-reanalysis/era-interim>.
18. Weather and climate change [Electronic resource] / Met Office. Mode of access: <http://www.metoffice.gov.uk/>.
19. Alekseev V.A., Volodin E.M., Galin V.Ya. Modeling the Present-Day Climate with the INM RAS Atmospheric Model. Preprint No. 2086-A98, IVM RAN (Moscow: Inst. of Numerical Math., 1998).
20. Galin V.Ya., Smyshlyaev S.P., Volodin E.M. Combined Chemistry–Climate Model of the Atmosphere. // Izv., Atmos. Ocean. Phys. 2007. V. 43. № 4. P. 399–412.
21. Яковлев А.П., Смышляев С.П. Численное моделирование глобального воздействия океана и явления Эль-Ниньо и Ла-Нинья на структуру и состав атмосферы // Ученые записки РГГМУ. 2017. Вып. № 49. С. 58–72.
22. Historical El Nino / La Nina episodes (1950–present) [Electronic resource] // United States Climate Prediction Center. 4 November 2015. Mode of access: http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ensoyears.shtml.
23. Варгин П.Н., Володин Е.М. Анализ воспроизведения динамических процессов в стратосфере климатической моделью ИВМ РАН // Известия

- РАН. Физика атмосферы и океана. 2016. Т. 52. № 1. С. 3–18.
24. *Scott R., Polvani L.* Internal variability of the winter stratosphere // *J. Atmos. Sci.* 2006. V. 63. P. 2758–2778.
25. *Погорельцев А. И., Савенкова Е. Н., Перцев Н. Н.* Внезапные стратосферные потепления: роль нормальных атмосферных мод // *Геомагнетизм и аэрономия.* 2014. Т. 54. № 3. С. 387–403.
26. *Karpechko A., Perlwitz J., Manzini E.* A model study of tropospheric impacts of the Arctic ozone depletion 2011 // *J. Geophys. Res.* V. 119. № D13. P. 7999–8014.
27. *Ball William T., Alsing J., Mortlock D. J., et al.* Evidence for a continuous decline in lower stratospheric ozone offsetting ozone layer recovery // *Atmospheric Chemistry and Physics.* 2018. V. 18. P. 1379–1394.
28. *Bell C., Gray L., Charlton-Perez A., Joshi M., Scaife A.* Stratospheric Communication of El Niño Teleconnections to European Winter. *J. Climate.* 2009. V. 22. P. 4083–4096.
29. *Garfinkel C., Hartmann D.* Different ENSO teleconnections and their effects on the stratospheric polar vortex. *J. Geophys. Res.* 2008. V. 113. D18114.
30. *Butler A., Polvani L.* El Niño, La Niña, and stratospheric sudden warmings: A reevaluation in light of the observational record 2011. *Geophys. Res. Lett.* 2011. V. 38. L13807.

Influence of ocean on dynamic of polar stratosphere and ozone layer

A.R. Jakovlev, S.P. Smyshlyayev

*Russian state hydrometeorology university
Voronezhskaya ul., 79, Saint Petersburg, 192007, Russia
E-mail: endrusj@rambler.ru, e-mail: smyshl@rshu.ru*

Received: 16.07.2018

Revised version received: 28.09.2018

Influence of the tropical oceanic processes (the El-Niño – La-Niña phenomenon) on structure and composition of a polar stratosphere is considered. Data of the reanalysis on sea surface temperature, a potential vorticity, temperatures of air, ozone mixing ratio and total ozone column per 1980–2016 are analyzed. Influence the El-Niño and La-Niña on circumpolar vorticity, temperature of air in a stratosphere and an ozone layer is studied. It is shown that the El-Niño leads to instability of circumpolar vorticity, causes sudden stratospheric warming and increase the content of ozone.

Keywords: sea surface temperature, El-Niño, La-Niña, temperature of air, sudden stratospheric warming, potential vorticity, circumpolar vorticity, ozone mixing ratio, total ozone column, ozone depletion