

# Влияние Южного колебания на арктические процессы: сравнение результатов спутниковых измерений, ре-анализа и численного моделирования

Выполнили:

Яковлев А.Р., Смышляев С.П.

Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург, Российская Федерация

<b><i>Цель исследования</i></b>	Выявление взаимосвязи явления Эль-Ниньо – Южное колебание и динамики и состава нижней и средней атмосферы
<b><i>Актуальность</i></b>	Проблема учёта влияния Эль-Ниньо и Южного колебания на динамику и состав атмосферы определяется важностью правильного учёта влияния изменений температуры поверхности океана на параметры атмосферы. Эта задача выполнима при комплексном подходе, который учитывает различные эффекты и процессы в атмосфере посредством современных методов и параметризаций, а также выделением из них влияния параметров океана.
<b><i>Задачи работы</i></b>	<ol style="list-style-type: none"><li>1) Проведение численных экспериментов по выявлению взаимосвязи между параметрами океана и динамикой и составом тропосферы и стратосферы в глобальном масштабе;</li><li>2) Сравнение результатов моделирования, данных ре-анализа и спутниковых измерений параметров атмосферы;</li><li>3) Исследование прямых и обратных связей между Эль-Ниньо – Южным колебанием и изменениями в динамике и составе атмосферы.</li></ol>
<b><i>Практическая значимость</i></b>	Повышение эффективности гидродинамического моделирования влияния явления Эль-Ниньо – Южного колебания на атмосферные процессы важно для обеспечения безопасности населения и эффективности народного хозяйства, а также для изучения изменений климата

# Методика достижения целей

Модель CCM (chemistry-climate model) представляет собой комбинацию двух частей – динамическую, которая была разработана в ИВМ РАН, и химическую, разработанную в РГГМУ.

Разрешение этой модели –  $5^{\circ}$  долготы и  $4^{\circ}$  широты. Охват по долготе от  $185^{\circ}$  з.д. до  $180^{\circ}$  в.д., по широте – от  $88^{\circ}$  ю.ш. до  $88^{\circ}$  с.ш. По вертикали количество  $\sigma$ -уровней модели равно 39 (от 0 до 88 км или от поверхности до уровня  $0.003$  гПа), при этом результаты моделирования интерполируются в изобарическую систему координат на 31 стандартную изобарическую поверхность. Количество узлов в модели 72 по долготе и 45 по широте. Шаг по времени – 6 минут. Модель обновляет начальные данные через каждые 6 часов (4 раза в сутки).

Основным методом данного исследования является численное моделирование атмосферных процессов.

## Исходные данные

В данном исследовании использовались исходные данные:

CIRA-86 и The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project - данные метеопараметров для моделирования

Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) Data Products User's Guide – спутниковые данные для озона

Данные NASA (NOAA GHCNv4 и ERSSTv5) по температуре воздуха у поверхности Земли

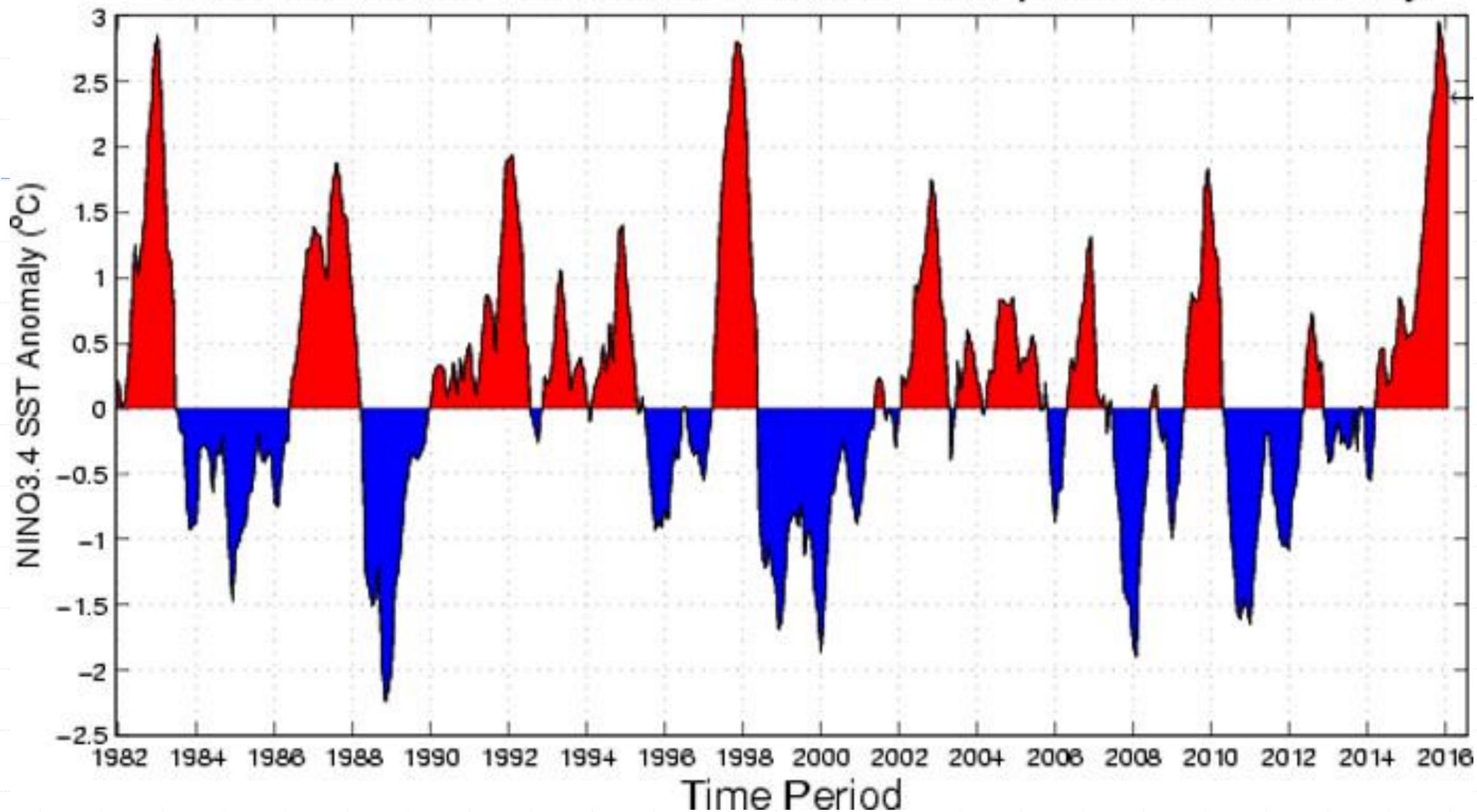
NOAA и ERA Interim – данные по ТПО и площади ледяного покрова (ПЛП)

MERRA2 и ERA Interim – данные ре-анализа

Проведено сравнение результатов моделирования с данными ре-анализа ERA Interim, MERRA2 и спутниковыми измерениями

Моделирование проводилось для периода с 1979 по 2018 годы. Данные ре-анализа и спутниковых измерений анализировались за этот же период.

# Historical NINO3.4 Sea Surface Temperature Anomaly

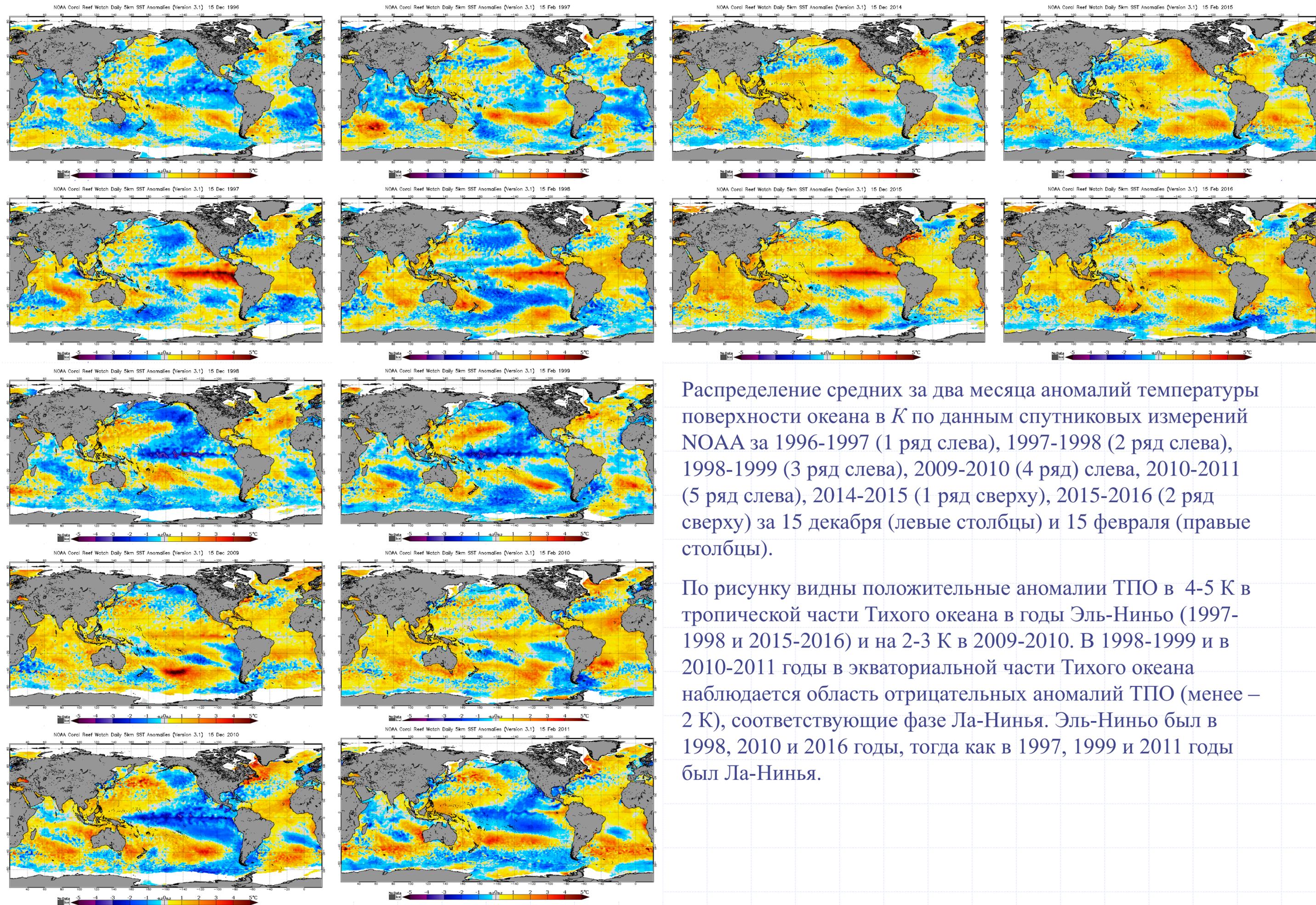


Аномалии ТПО для тропической части Тихого океана за период с 1982 по 2016 годы

Мощная фаза Эль-Ниньо наблюдалась в 1982-1983, 1986-1987, 1991-1992, 1997-1998, 2002-2003, 2009-2010 и в 2015-2016. Мощная фаза Ла-Нинья наблюдалась в 1988-1989, 1996-1997, 1998-1999, 2007-2008 и в 2010-2011.

Проведён анализ данных по аномалиям ТПО и температуре воздуха в тропической части Тихого океана и по потенциальному вихрю, температуре воздуха, концентрации и общему содержанию озона для стратосферы Арктики за 1996-1997, 1997-1998, 1998-1999, 2009-2010, 2010-2011, 2014-2015 и 2015-2016 годы (с декабря по март).

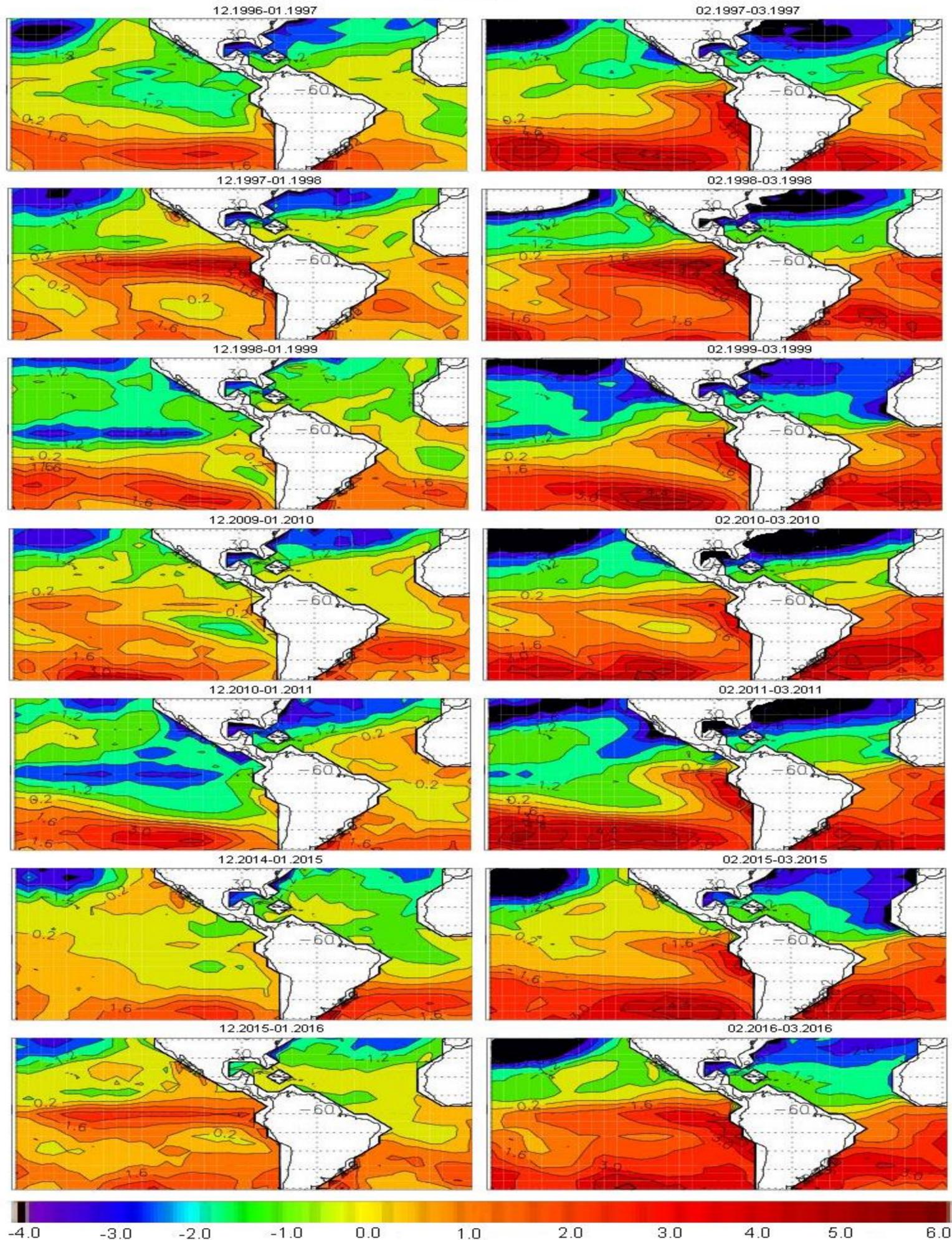
# Аномалии ТПО в Тихом океане по спутниковым измерениям



Распределение средних за два месяца аномалий температуры поверхности океана в К по данным спутниковых измерений NOAA за 1996-1997 (1 ряд слева), 1997-1998 (2 ряд слева), 1998-1999 (3 ряд слева), 2009-2010 (4 ряд) слева, 2010-2011 (5 ряд слева), 2014-2015 (1 ряд сверху), 2015-2016 (2 ряд сверху) за 15 декабря (левые столбцы) и 15 февраля (правые столбцы).

По рисунку видны положительные аномалии ТПО в 4-5 К в тропической части Тихого океана в годы Эль-Ниньо (1997-1998 и 2015-2016) и на 2-3 К в 2009-2010. В 1998-1999 и в 2010-2011 годы в экваториальной части Тихого океана наблюдается область отрицательных аномалий ТПО (менее -2 К), соответствующие фазе Ла-Нинья. Эль-Ниньо был в 1998, 2010 и 2016 годы, тогда как в 1997, 1999 и 2011 годы был Ла-Нинья.

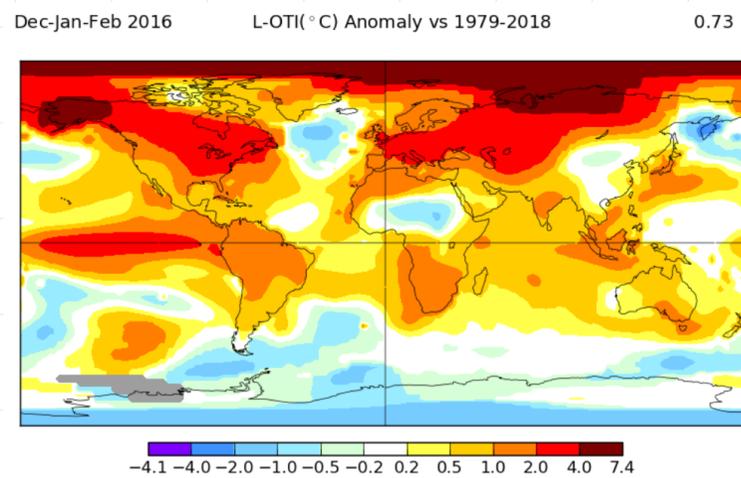
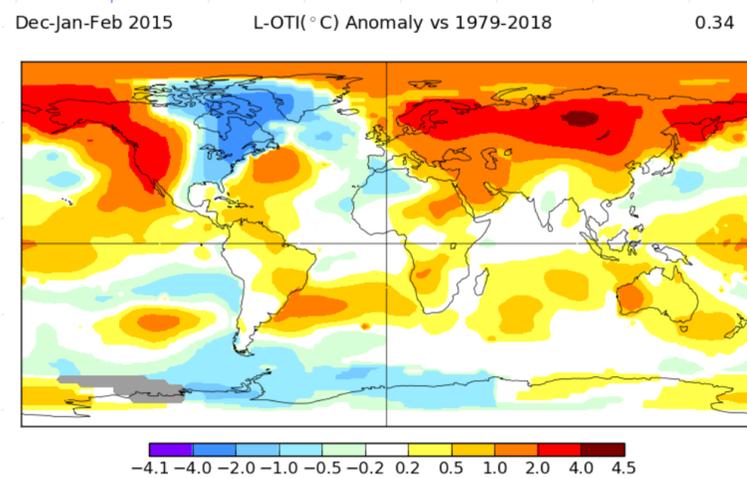
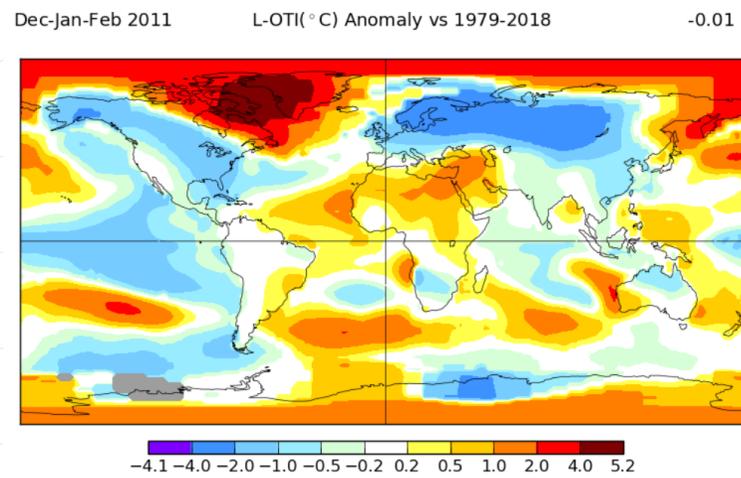
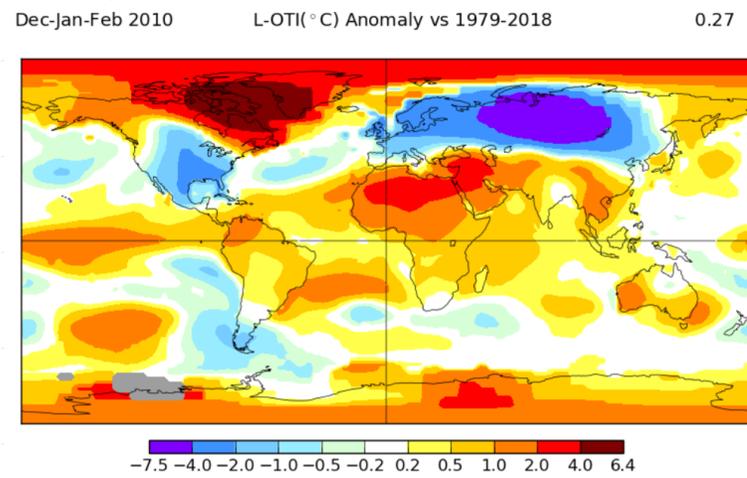
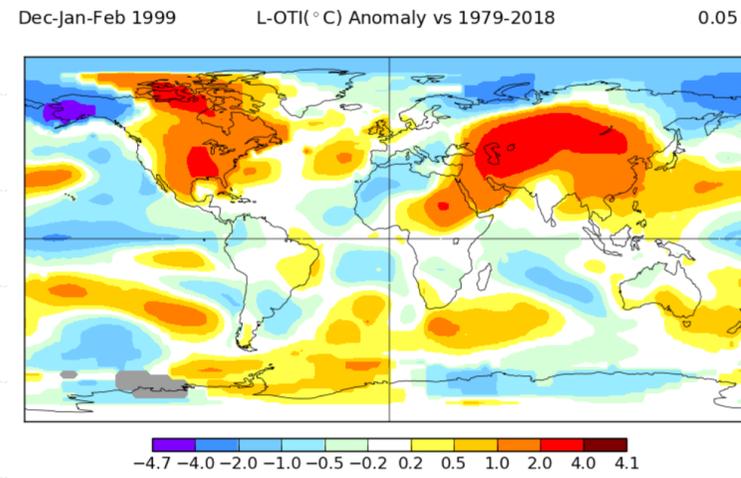
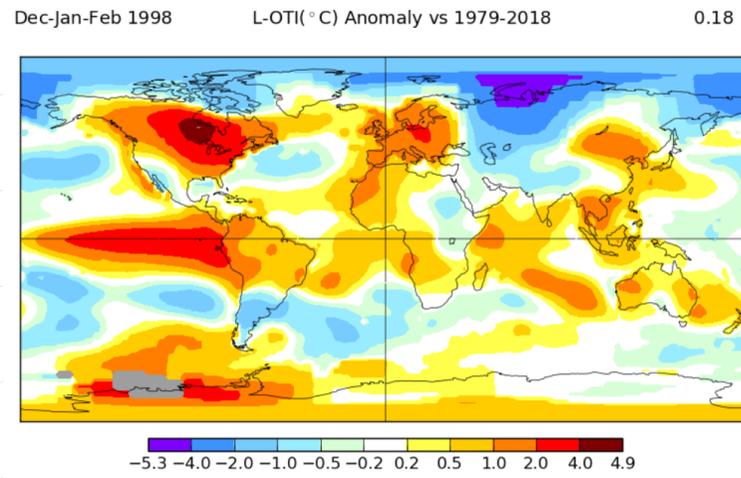
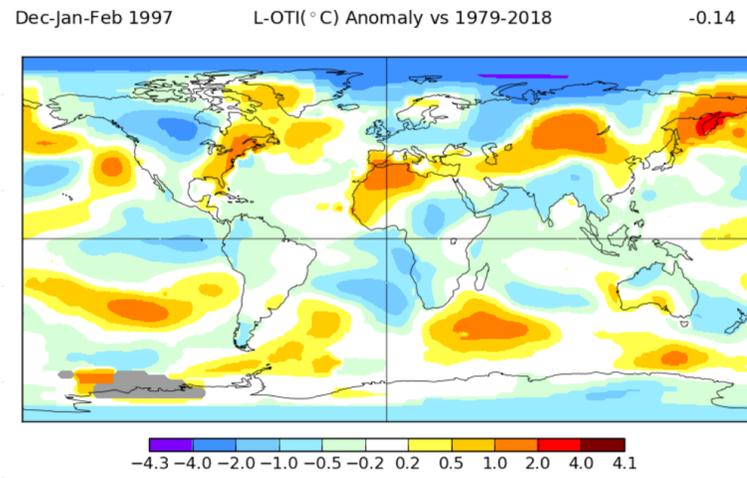
dSST, K



Распределение средних за два месяца аномалий температуры поверхности океана в К на области  $40^{\circ}$  ю.ш. –  $40^{\circ}$  с.ш. и  $180^{\circ}$  з.д. –  $0^{\circ}$  долготы по данным ERA Interim за 1996-1997 (1 ряд), 1997-1998 (2 ряд), 1998-1999 (3 ряд), 2009-2010 (4 ряд), 2010-2011 (5 ряд), 2014-2015 (6 ряд), 2015-2016 (7 ряд) за декабрь-январь (левый столбец) и февраль-март (правый столбец).

По рисунку видно сильное потепление на 2-4 К в тропической части Тихого океана в годы Эль-Ниньо (1997-1998, 2009-2010, 2015-2016). В периоды с декабря по март в 1998-1999 годы и в 2010-2011 годы в экваториальной части Тихого океана наблюдаются отрицательные аномалии ТПО (менее  $-1$  К) – фаза Ла-Нинья. Эль-Ниньо был в 1998, 2010 и 2016 годы, тогда как в 1999 и 2011 годы был Ла-Нинья. В 1997 год имел место слабый Ла-Нинья с аномалиями ТПО в  $-0.8$  К. В 2014-2015 наблюдается слабый Эль-Ниньо с аномалией ТПО  $0.5-0.8$  К. Данные ре-анализа, в целом, соответствуют спутниковым измерениям.

# Аномалии температуры воздуха в Тихом океане по данным спутниковых измерений

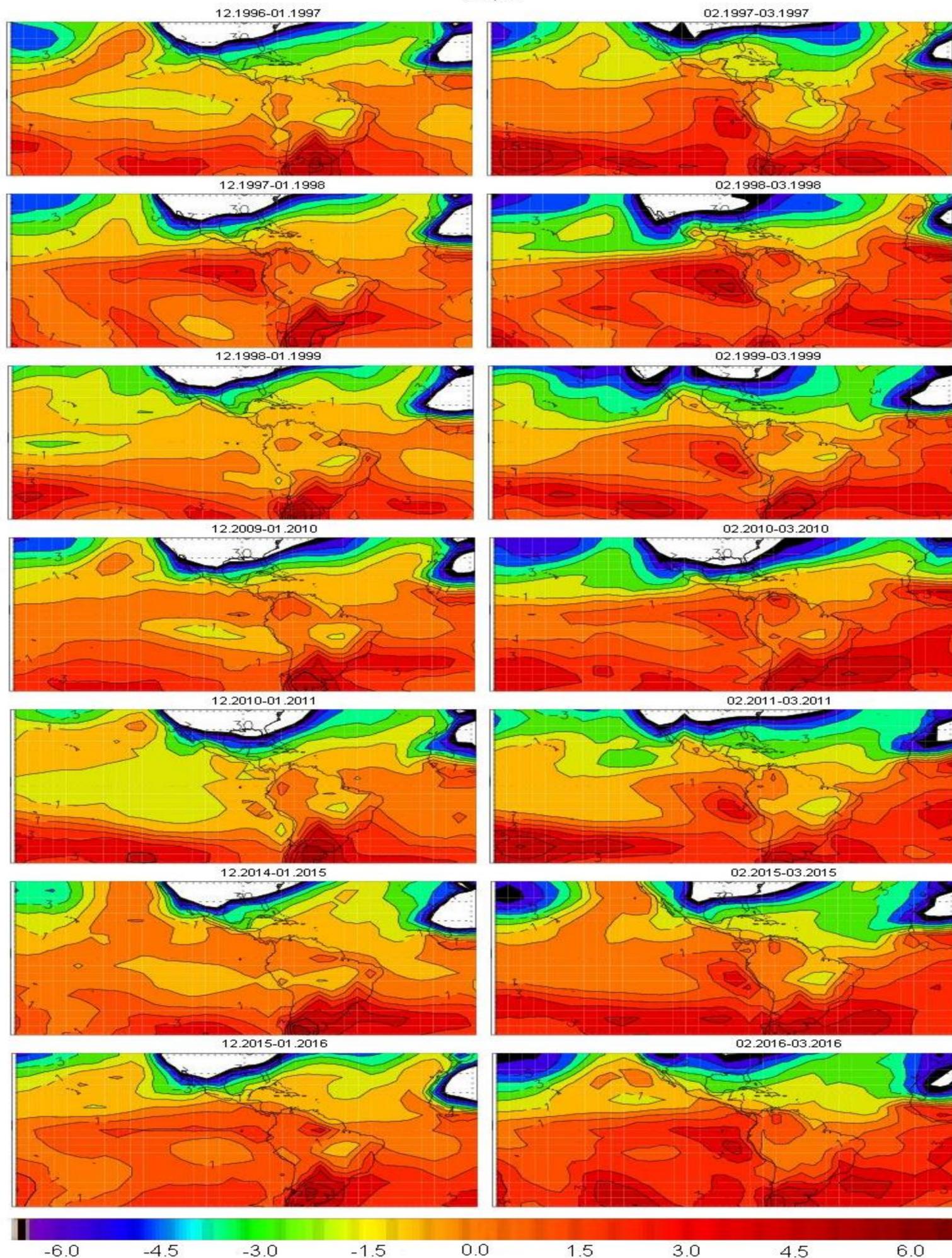


Распределение средних за декабрь-январь-февраль аномалий температуры воздуха в  $K$  по данным спутниковых измерений NASA (NOAA GHCNv4 и ERSSTv5) за 1996-1997, 1997-1998 и 1998-1999 (1 ряд), 2009-2010 и 2010-2011 (2 ряд), 2014-2015 и 2015-2016 (3 ряд).

Также, как и в случае с аномалиями ТПО, по рисунку видно сильное потепление на 2-4 К в тропической части Тихого океана в годы Эль-Ниньо (1997-1998, 2009-2010, 2015-2016). В годы Ла-Нинья (в 1996-1997, в 1998-1999 и в 2010-2011) в экваториальной части Тихого океана наблюдается область отрицательных аномалий температуры воздуха (менее  $-0.5 K$ ). В целом, аномалии температуры воздуха над Тихим океаном соответствуют аномалиям ТПО в этом регионе.

# Аномалии температуры воздуха в Тихом океане по данным ре-анализа

ΔT, К

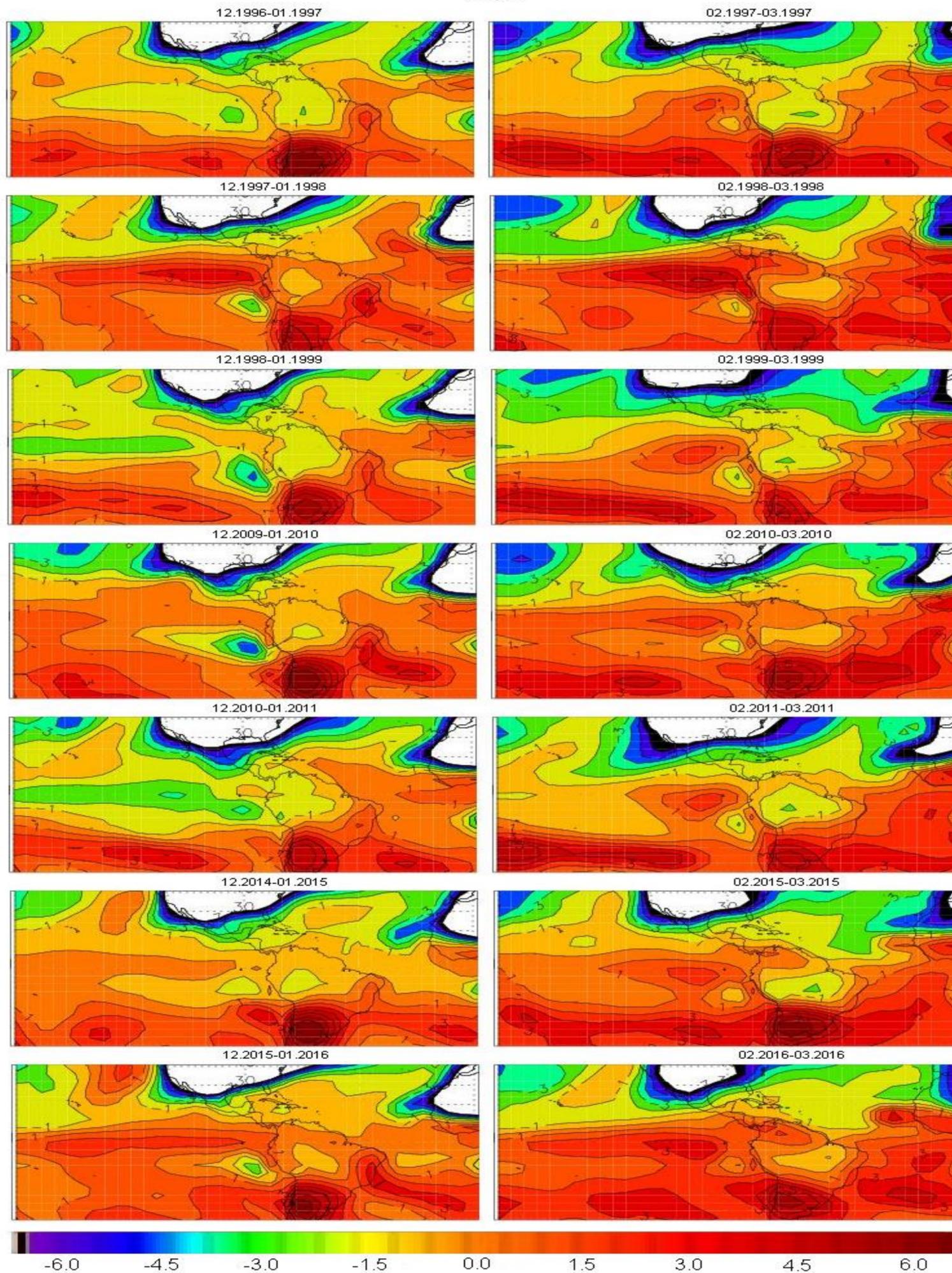


Распределение средних за два месяца аномалий температуры воздуха в К на области  $40^{\circ}$  ю.ш. –  $40^{\circ}$  с.ш. и  $180^{\circ}$  з.д. –  $0^{\circ}$  долготы по данным ERA Interim за 1996-1997 (1 ряд), 1997-1998 (2 ряд), 1998-1999 (3 ряд), 2009-2010 (4 ряд), 2010-2011 (5 ряд), 2014-2015 (6 ряд), 2015-2016 (7 ряд) за декабрь-январь (левый столбец) и февраль-март (правый столбец).

Также, как и в случае с аномалиями ТПО и данными спутниковых измерений, по рисунку видно сильное потепление на 1.5-3 К в тропической части Тихого океана в годы Эль-Ниньо (1997-1998, 2009-2010, 2015-2016). В годы Ла-Нинья (в 1996-1997, в 1998-1999 и в 2010-2011) в экваториальной части Тихого океана наблюдается область отрицательных аномалий температуры воздуха (менее  $-1$  К). В целом, аномалии температуры воздуха над Тихим океаном соответствуют аномалиям ТПО в этом регионе.

# Аномалии температуры воздуха в Тихом океане по результатам моделирования

$\Delta T, K$

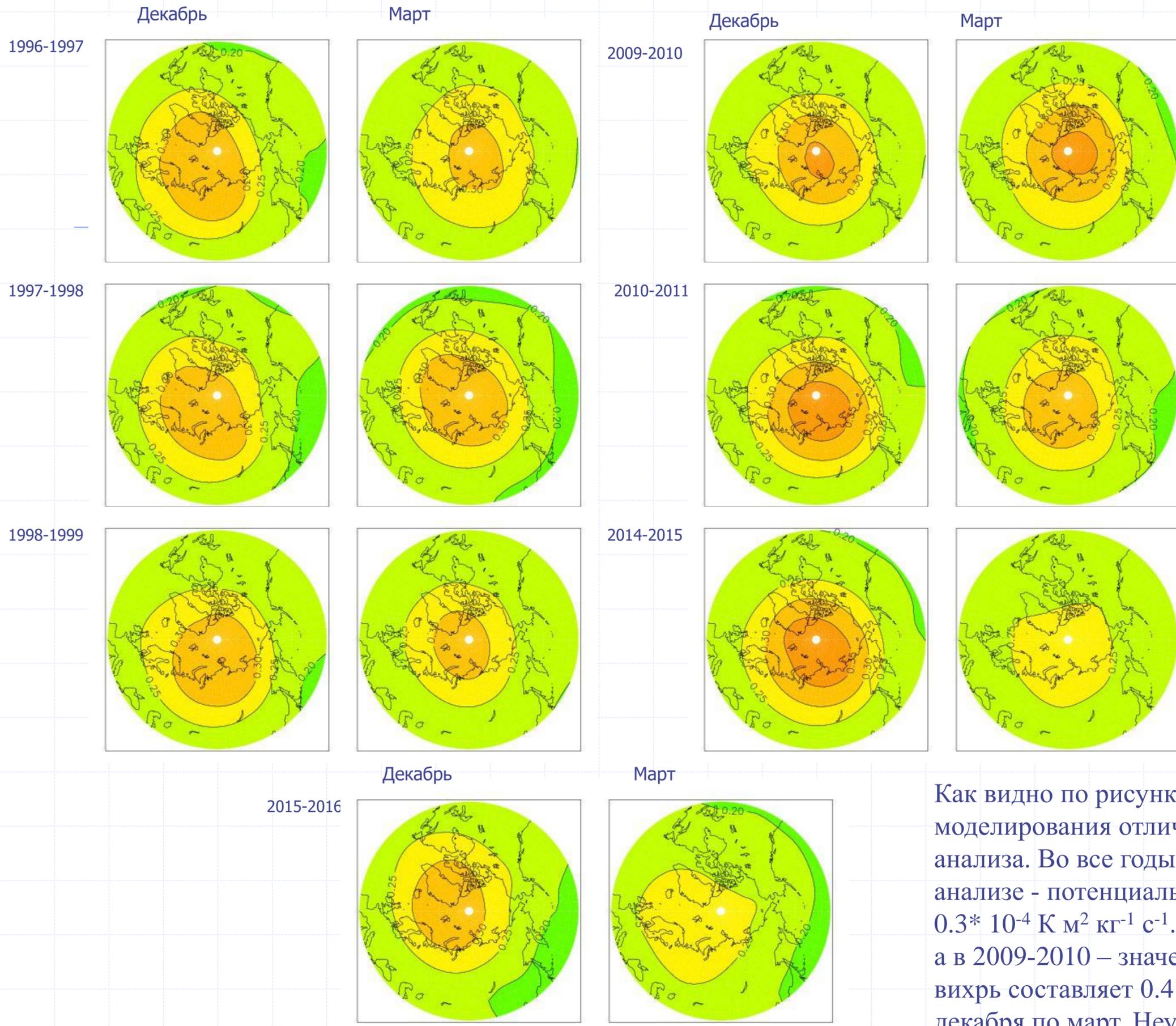


Распределение средних за два месяца аномалий температуры воздуха в  $K$  на области  $40^{\circ}$  ю.ш. –  $40^{\circ}$  с.ш. и  $180^{\circ}$  з.д. –  $0^{\circ}$  долготы по результатам моделирования за 1996-1997 (1 ряд), 1997-1998 (2 ряд), 1998-1999 (3 ряд), 2009-2010 (4 ряд), 2010-2011 (5 ряд), 2014-2015 (6 ряд), 2015-2016 (7 ряд) за декабрь-январь (левый столбец) и февраль-март (правый столбец).

Также, как и в случае с аномалиями температуры по данным ре-анализа, по рисунку видны положительные аномалии температуры воздуха в 1.5-3 K в тропической части Тихого океана в годы Эль-Ниньо (1997-1998, 2009-2010, 2015-2016). В годы Ла-Нинья (в 1996-1997, в 1998-1999 и в 2010-2011) в экваториальной части Тихого океана наблюдается отрицательные аномалии температуры воздуха (менее  $-1 K$ ). Отличие от ре-анализа в том, что во все годы наблюдается небольшая область отрицательных аномалий температуры в 1-2 K к западу от берега Южной Америки, которая усиливает Ла-Нинья в 1996-1997 и 2010-2011 годы, тогда как на Эль-Ниньо она слабо влияет.



# Потенциальный вихрь по результатам моделирования

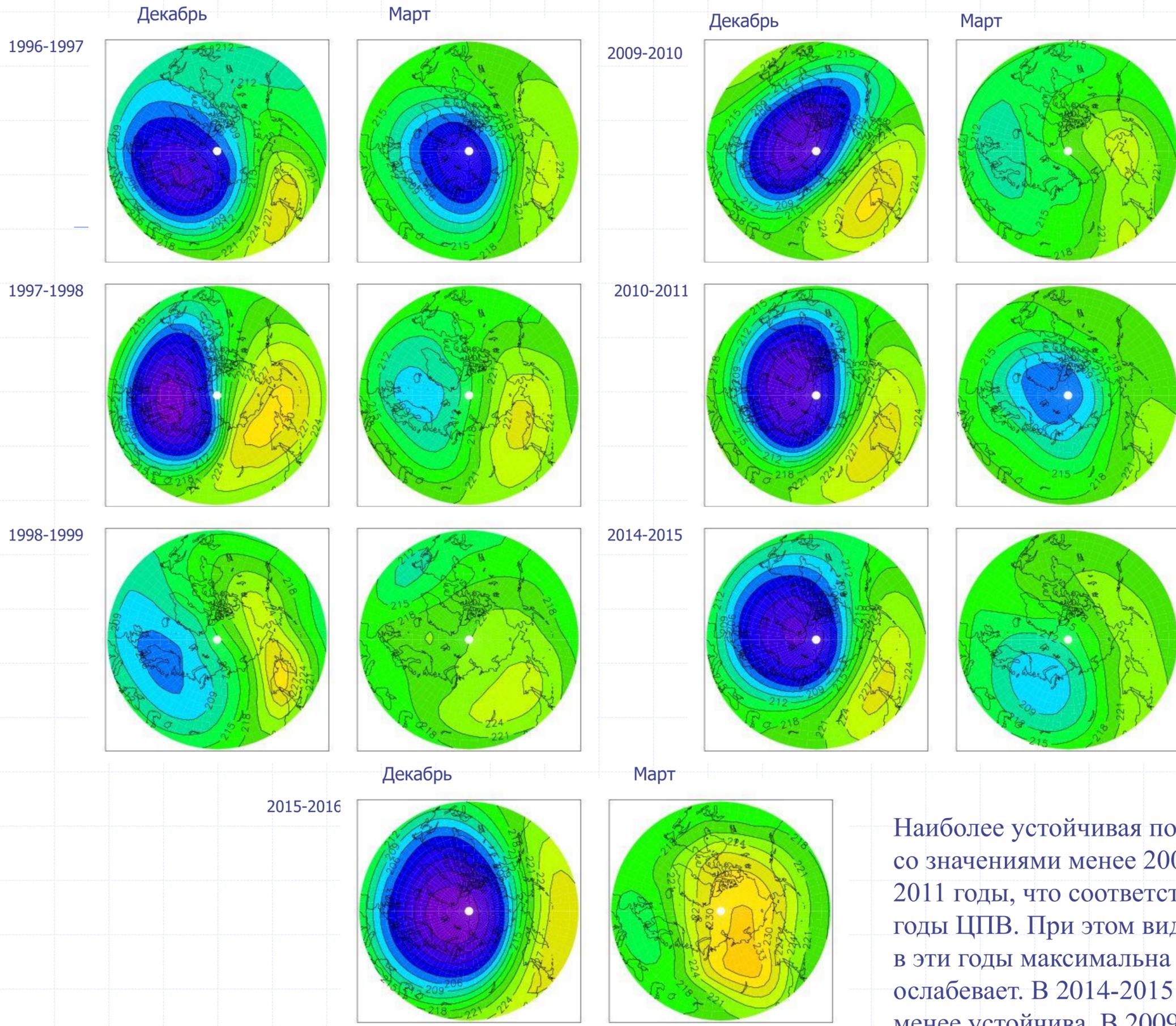


Среднемесячное распределение потенциального вихря на северном полушарии в  $10^4 \text{ К м}^2 \text{ кг}^{-1} \text{ с}^{-1}$  на области  $40^\circ \text{ с.ш.} - 90^\circ \text{ с.ш.}$  и высоте потенциальной температуры  $550 \text{ К}$  по результатам моделирования за декабрь и март 1996-1997, 1997-1998 и 1998-1999 годов (слева), 2009-2010, 2010-2011 и 2014-2015 годов (справа), 2015-2016 годов (внизу).

Как видно по рисунку, результаты моделирования отличаются от данных ре-анализа. Во все годы ЦПВ слабее, чем в ре-анализе - потенциальный вихрь составляет до  $0.3 \cdot 10^{-4} \text{ К м}^2 \text{ кг}^{-1} \text{ с}^{-1}$ . Наиболее устойчив ЦПВ а в 2009-2010 – значение потенциальный вихрь составляет  $0.4 \cdot 10^{-4} \text{ К м}^2 \text{ кг}^{-1} \text{ с}^{-1}$  с декабря по март. Неустойчив ЦПВ в 2014-2015 и 2015-2016 годы – потенциальный вихрь уменьшается до  $0.25 \cdot 10^{-4} \text{ К м}^2 \text{ кг}^{-1} \text{ с}^{-1}$ .



# Температура воздуха в стратосфере Арктики по данным ре-анализа

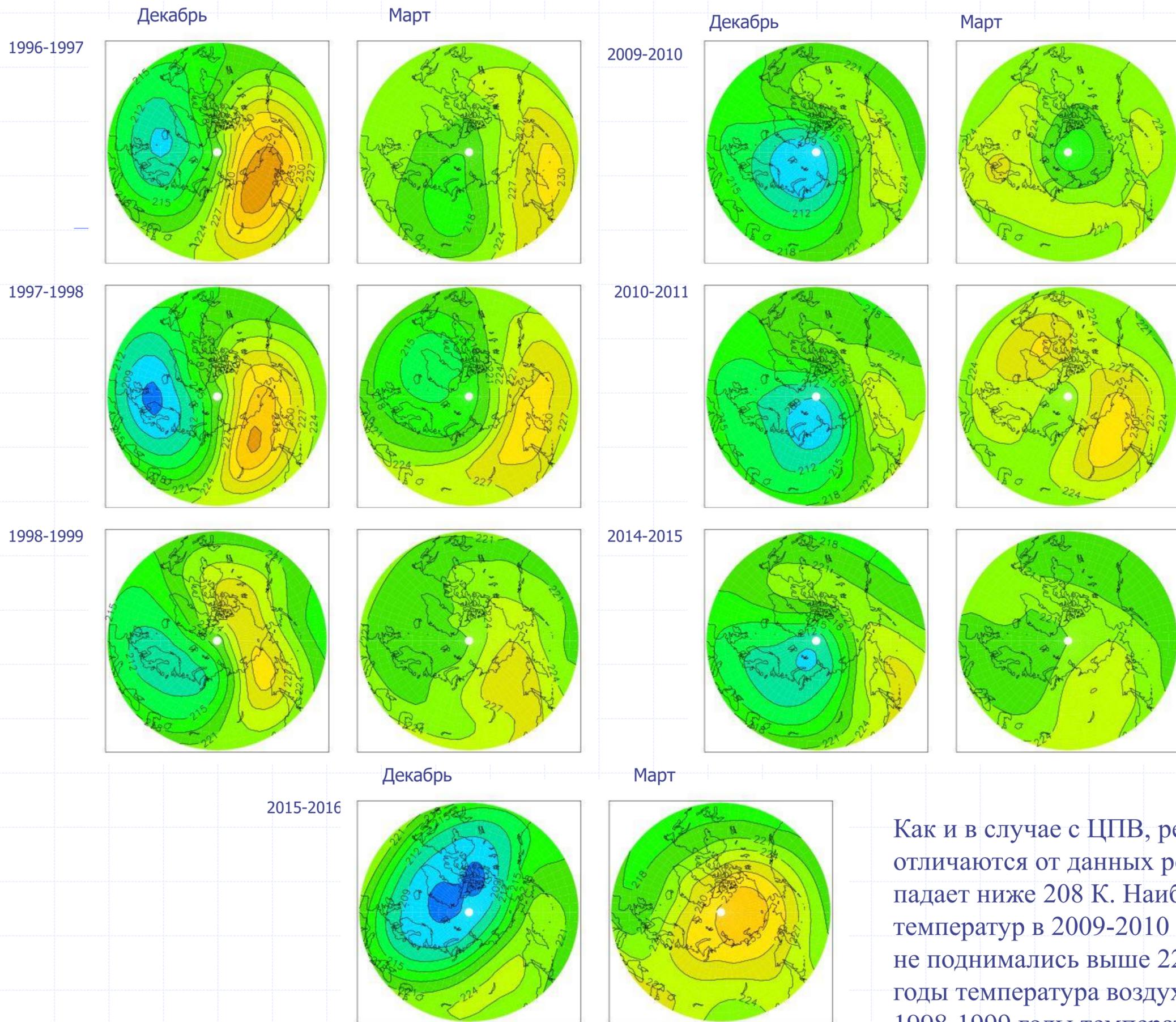


Среднемесячное распределение температуры воздуха на северном полушарии в  $K$  на области  $40^{\circ}$  с.ш. –  $90^{\circ}$  с.ш. и высоте 24.5 км (30 гПа) по данным MERRA2 за декабрь и март 1996-1997, 1997-1998 и 1998-1999 годов (слева), 2009-2010, 2010-2011 и 2014-2015 годов (справа), 2015-2016 годов (внизу).



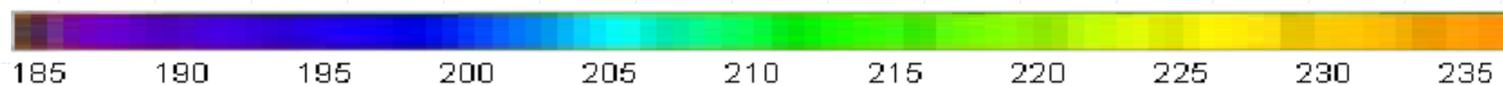
Наиболее устойчивая полярная область низких температур со значениями менее 200 К существует в 1996-1997 и 2010-2011 годы, что соответствует наиболее устойчивому в эти годы ЦПВ. При этом видно, что область низких температур в эти годы максимальна с декабря по февраль, а затем ослабевает. В 2014-2015 году область низких температур менее устойчива. В 2009-2010 и 2015-2016 годы области низких температур существовали только в декабре и январе, после чего исчезли. В 1998-1999 году область низких температур была неустойчива.

# Температура воздуха в стратосфере Арктики по результатам моделирования

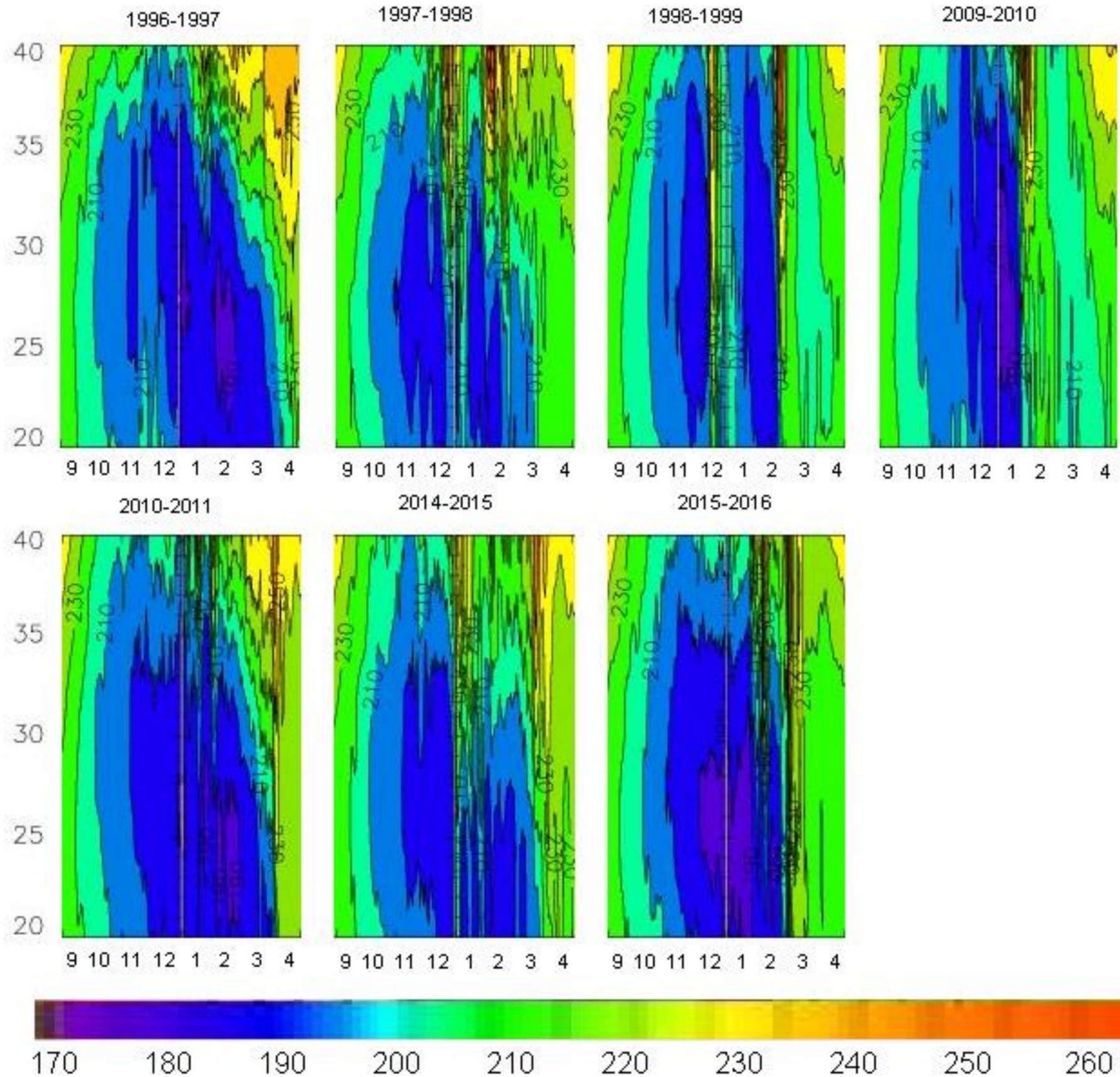


Среднемесячное распределение температуры воздуха на северном полушарии в  $K$  на области  $40^{\circ}$  с.ш. –  $90^{\circ}$  с.ш. и высоте 24.5 км (30 гПа) по результатам моделирования за декабрь и март 1996-1997, 1997-1998 и 1998-1999 годов (слева), 2009-2010, 2010-2011 и 2014-2015 годов (справа), 2015-2016 годов (внизу).

Как и в случае с ЦПВ, результаты моделирования отличаются от данных ре-анализа. Температура воздуха не падает ниже 208 К. Наиболее устойчива область низких температур в 2009-2010 и в 2014-2015 годы – температуры не поднимались выше 220 К над Арктикой. В 2015-2016 годы температура воздуха поднялась до 232 К. В 1997-1998-1999 годы температура воздуха поднялась до 220 К.



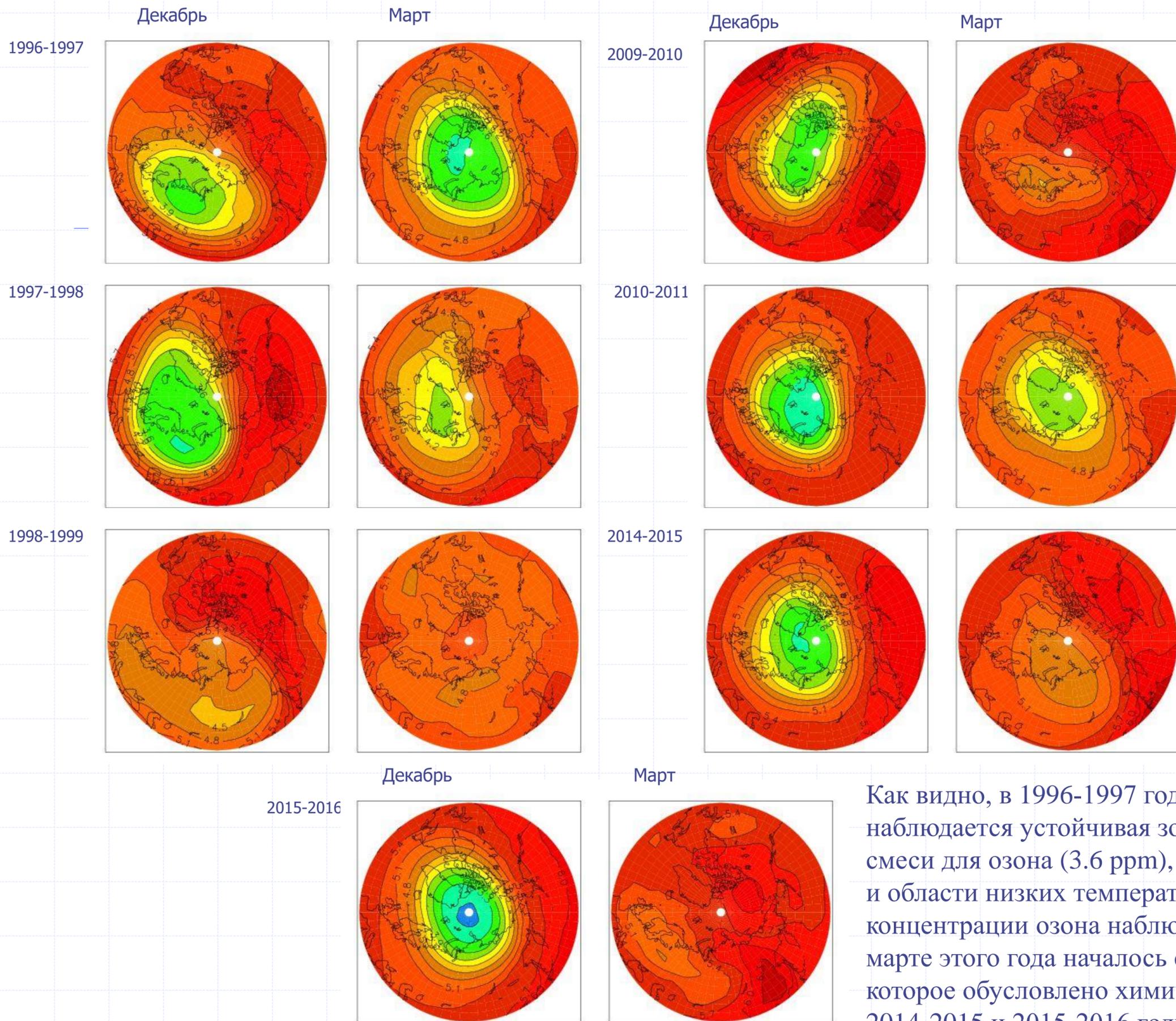
# Вертикальные профили температуры воздуха по данным ре-анализа



Вертикальные годовые профили температуры воздуха в  $K$  по среднесуточным данным MERRA2 на широте  $84^{\circ}$  с.ш. за 1996-1997, 1997-1998, 1998-1999, 2009-2010, 2010-2011, 2014-2015, 2015-2016 годы.

Внезапные стратосферные потепления (ВСП) практически отсутствуют в полярных широтах в 1997 и в 2011 годах – в период с января по апрель существует устойчивая зона холода. Чаще всего ВСП наблюдались в полярных широтах с января по апрель в 2010 и в 2015 годы. Эти ВСП привели к неустойчивости области низких температур над северным полюсом в эти годы. В 2016 году в полярных широтах наблюдается область низких температур с января по март, после чего он прерывается серией ВСП. Аналогичная картина наблюдается в 1998 и 1999 году.

# Отношение смеси озона в стратосфере Арктики по данным ре-анализа

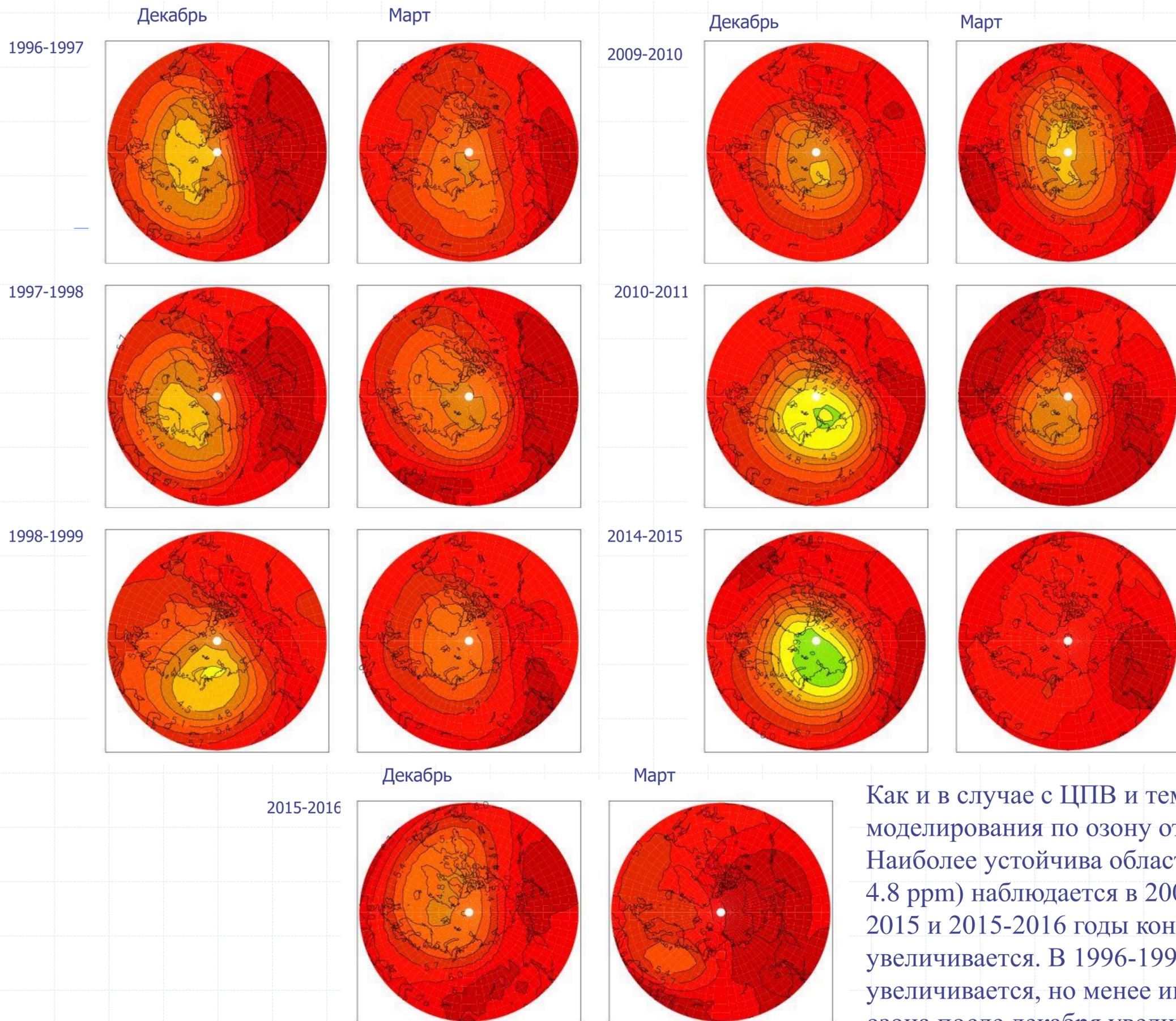


Среднемесячное распределение отношения смеси для озона на северном полушарии в ppm на области  $40^{\circ}$  с.ш. –  $90^{\circ}$  с.ш. и высоте 24.5 км (30 гПа) по данным MERRA2 за декабрь и март 1996-1997, 1997-1998 и 1998-1999 годов (слева), 2009-2010, 2010-2011 и 2014-2015 годов (справа), 2015-2016 годов (внизу).

Как видно, в 1996-1997 годы над северным полюсом наблюдается устойчивая зона низкого значения отношения смеси для озона (3.6 ppm), что соответствует устойчивому ЦПВ и области низких температур. Менее выраженное сокращение концентрации озона наблюдается в 2010-2011 годы, при этом в марте этого года началось сокращение концентрации озона, которое обусловлено химическими процессами. В 2009-2010, 2014-2015 и 2015-2016 годы существенное уменьшение концентрации озона наблюдается в декабре и январе, тогда как далее оно начинает стремительно увеличиваться, что может быть связано с серией ВСП в эти годы.



Отношение смеси озона в стратосфере Арктики по результатам моделирования

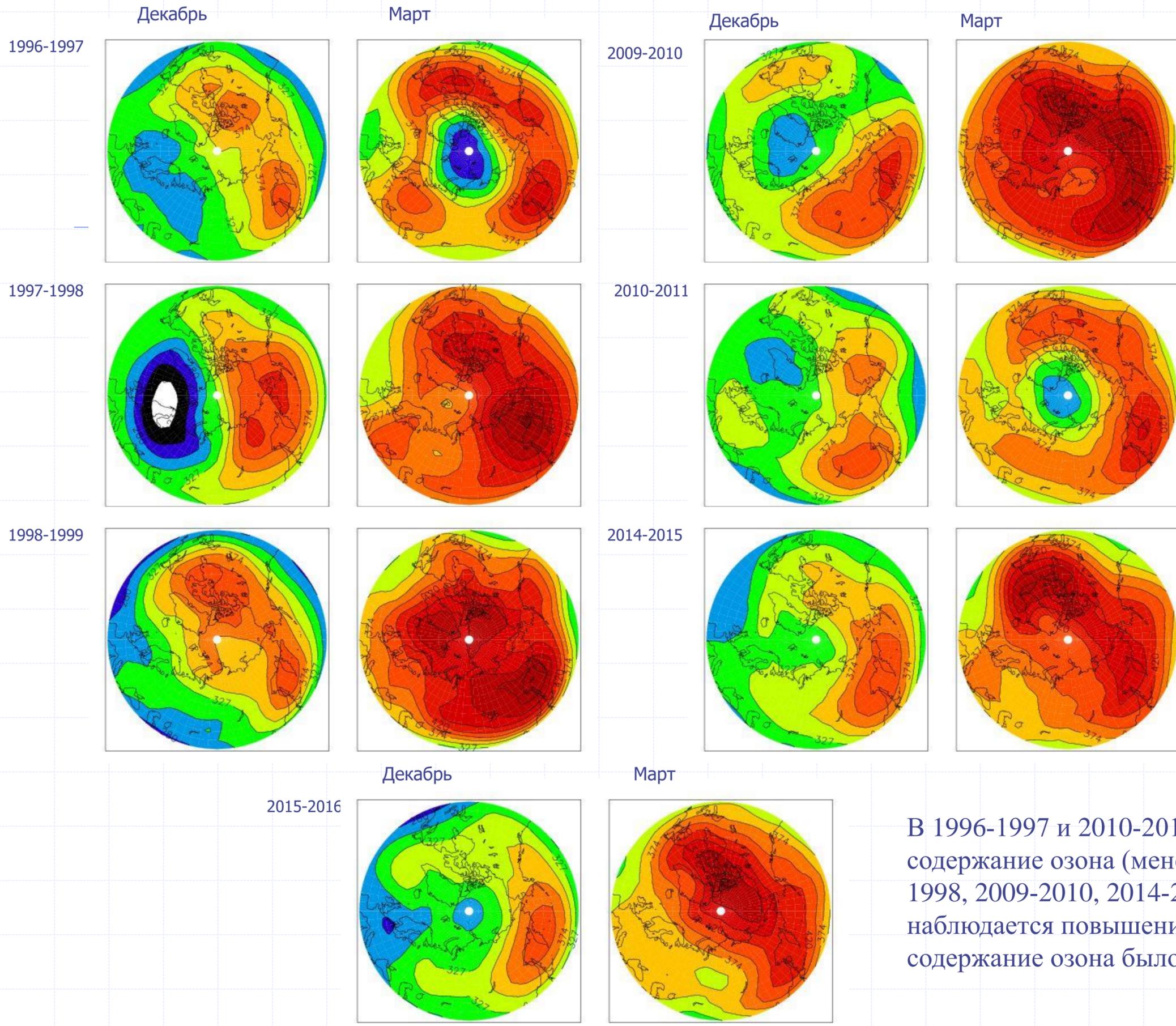


Среднемесячное распределение отношения смеси для озона на северном полушарии в ррт на области  $40^{\circ}$  с.ш. –  $90^{\circ}$  с.ш. и высоте 24.5 км (30 гПа) по результатам моделирования за декабрь и март 1996-1997, 1997-1998 и 1998-1999 годов (слева), 2009-2010, 2010-2011 и 2014-2015 годов (справа), 2015-2016 годов (внизу).

Как и в случае с ЦПВ и температурой воздуха, результаты моделирования по озону отличаются от данных ре-анализа. Наиболее устойчива область низких концентраций озона (менее 4.8 ррт) наблюдается в 2009-2010, и 2010-2011 годы. В 2014-2015 и 2015-2016 годы концентрация озона быстро увеличивается. В 1996-1997 и 1998-1999 концентрация озона увеличивается, но менее интенсивно. В 1997-1998 концентрация озона после декабря увеличилась с 4.5 ррт до 5.7 ррт, а в марте – уменьшилась до 4.8 ррт.

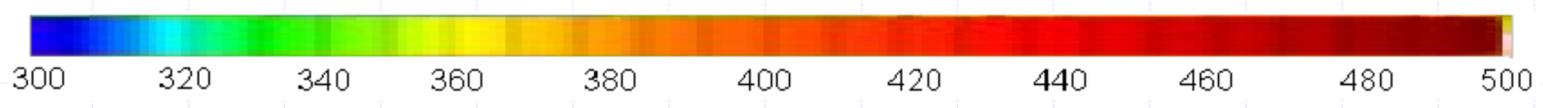


Общее содержание озона в Арктике по данным ре-анализа

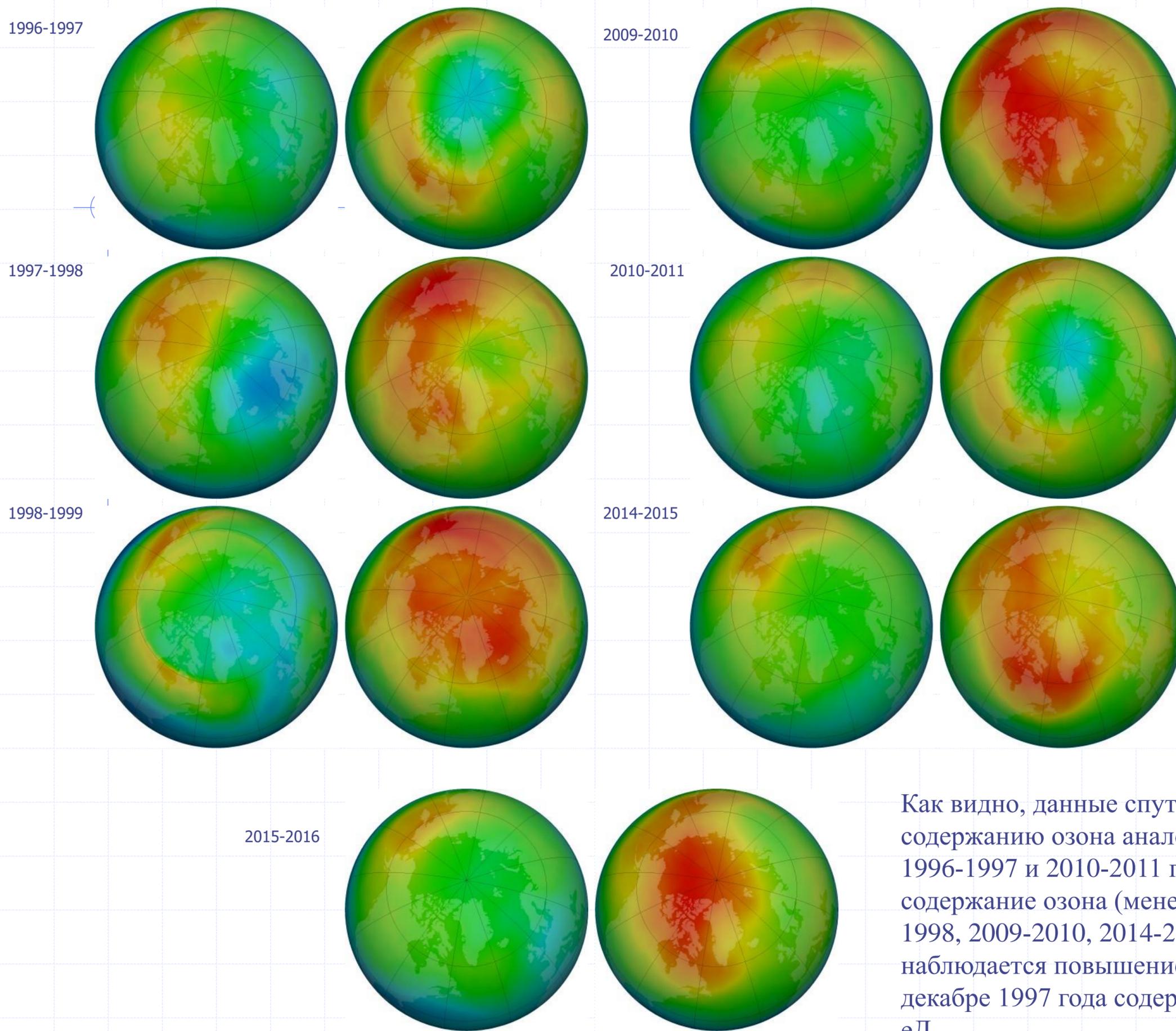


Среднемесячное распределение общего содержания озона на северном полушарии в еД на области 40<sup>0</sup> с.ш. – 90<sup>0</sup> с.ш. по данным ERA Interim за декабрь и март 1996-1997, 1997-1998 и 1998-1999 годов (слева), 2009-2010, 2010-2011 и 2014-2015 годов (справа), 2015-2016 годов (внизу).

В 1996-1997 и 2010-2011 годы наблюдалось низкое содержание озона (менее 305 еД), тогда как в 1997-1998, 2009-2010, 2014-2015 и 2015-2016 годы наблюдается повышение до 400 еД. В 1999 году содержание озона было высоким – не менее 350 еД.

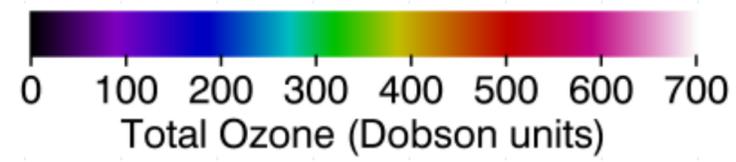


# Общее содержание озона в Арктике по данным спутниковых измерений



Среднемесячное распределение общего содержания озона на северном полушарии в еД на области 40<sup>0</sup> с.ш. – 90<sup>0</sup> с.ш. по данным спутниковых измерений TOMS за декабрь и март 1996-1997, 1997-1998 и 1998-1999 годов (слева), 2009-2010, 2010-2011 и 2014-2015 годов (справа), 2015-2016 годов (внизу).

Как видно, данные спутниковых измерений по содержанию озона аналогичны данным ре-анализа. В 1996-1997 и 2010-2011 годы наблюдалось низкое содержание озона (менее 280 еД), тогда как в 1997-1998, 2009-2010, 2014-2015 и 2015-2016 годы наблюдается повышение до 420 еД. При этом в декабре 1997 года содержание озона было менее 240 еД.



# Выводы

1 Явление Эль-Ниньо оказывает наибольшее влияние в тропическом регионе и в нижней тропосфере

2 Явление Эль-Ниньо может вызывать внезапные стратосферные потепления

3 Явление Эль-Ниньо может приводить к неустойчивости циркумполярного вихря, что приводит к повышению концентрации стратосферного озона

4 Явление Эль-ниньо может приводить к увеличению общего содержания озона в атмосфере

Также обнаружено, что результаты моделирования в стратосфере отличаются от данных ре-анализа и спутниковых измерений, что объясняется влиянием химических и динамических факторов в стратосфере.

Система Эль-Ниньо – Южная осцилляция является важной составляющей глобального механизма системы океан-атмосфера и вносит существенный вклад не только в тропической части тропосферы, где этот механизм находится, но и на атмосферу умеренных и полярных областей, а также на стратосферу. Это позволяет рассматривать влияние этого процесса на термический режим и динамику атмосферы, а также на состояние озонового слоя в глобальном масштабе.

Применяемые методы исследования и полученные результаты, в целом, применимы для тропических районов, так и для далёких от тропического пояса районов земного шара.

Спасибо за  
внимание!