

**Результаты моделирования циркуляции  
нижней и средней атмосферы Земли с  
высоким пространственным  
разрешением**

*К.Г. Орлов, И.В. Мингалев, Е.А. Федотова, В.С. Мингалев  
Полярный геофизический институт*

В работе обсуждаются результаты численного моделирования общей циркуляции атмосферы Земли в диапазоне высот от 0 до 80 км в разные сезоны, полученные с помощью новой версии модели с высоким пространственным разрешением по горизонту (около 26 км).

Обсуждаются процессы возникновения и эволюции крупномасштабных вихрей в нижней атмосфере и влияние горных систем на места их образования.

Также обсуждается поведение циркумполярных вихрей при смене сезонов.

# Динамическое ядро

Динамическое ядро нашей модели основано на численном интегрировании полной системы уравнений динамики вязкого атмосферного газа с помощью явной консервативной схемы. В нем используется равномерная сетка по высоте с шагом 200 м и специальная сетка по широте и долготе, которая является комбинацией нескольких обычных широтно-долготных сеток с постоянным шагом.

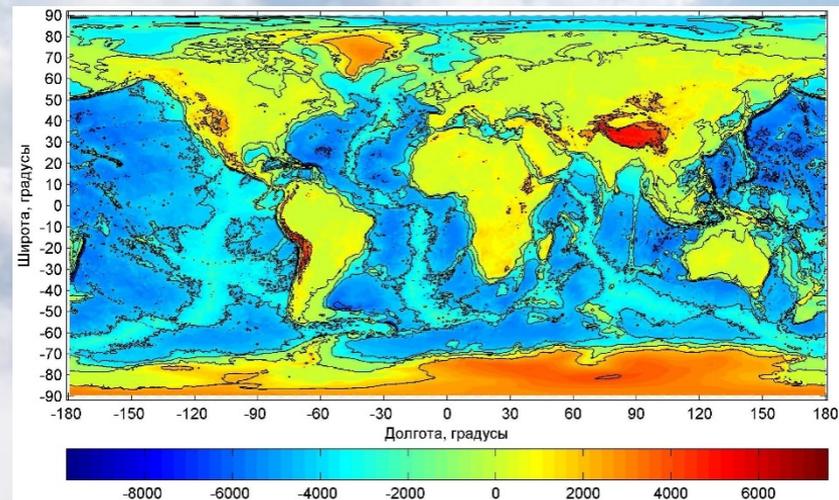
В модели учитывается несферичность земной поверхности и несферичность гравитационного поля Земли. Область моделирования простирается от поверхности Земли до сферы, центр которой совпадает с центром Земли.

Важная особенность нашей модели состоит в том, что ее динамическое ядро полностью работает на графических процессорах и использует массивно параллельные вычисления. Это позволяет проводить расчеты одновременно на нескольких графических процессорах последнего поколения с высокой скоростью.

*Mingalev I.V., Orlov K.G., Mingalev V.S.* Numerical Modeling of the Influence of the Relief of a Planet on the Global Circulation of the Earth's Stratosphere and Mesosphere // *Atmospheric and Climate Sciences*, 2017, том 7, № 04, с. 496-510

*Четверушкин Б.Н., Мингалев И.В., Орлов К.Г., Четкин В.М., Мингалев В.С., Мингалев О.В.* Газодинамическая модель общей циркуляции нижней и средней атмосферы Земли // *Математическое моделирование*, 2017, том 29, № 8, с. 59-73

Поверхность Земли, м



# Радиационный блок



В радиационном блоке используются новые параметризации молекулярного поглощения для расчета полей собственного и солнечного излучения атмосферы в диапазонах частот  $10 - 2000 \text{ см}^{-1}$  и  $2000 - 50000 \text{ см}^{-1}$  соответственно. Поля излучения рассчитываются в интервале высот от поверхности Земли до 100 км.

Алгоритм построения этих параметризаций учитывает изменение газового состава атмосферы с высотой, а также учитывает нарушение локально термодинамического равновесия в верхней атмосфере в полосах поглощения озона с длинами волн около  $9,6 \text{ мкм}$  и полосах поглощения углекислого газа с длинами волн около  $15,6 \text{ мкм}$ , а также  $4,2$  и  $2,7 \text{ мкм}$ . Кроме того, для численного решения уравнения переноса излучения используется метод дискретных ординат и расчетная сетка по зенитным углам с шагом около  $9$  градусов.

*Мингалев И.В., Федотова Е.А., Орлов К.Г.* Построение параметризаций молекулярного поглощения в нижней и средней атмосфере Земли в ИК-диапазоне // Оптика атмосферы и океана, 2018, том 31, № 10, с. 779-786

*Четверушкин Б.Н., Мингалев И.В., Федотова Е.А., Орлов К.Г., Четкин В.М., Мингалев В.С.* Расчет собственного излучения атмосферы в модели общей циркуляции нижней и средней атмосферы Земли // Математическое моделирование, 2020, том 32, № 2, с. 77-100

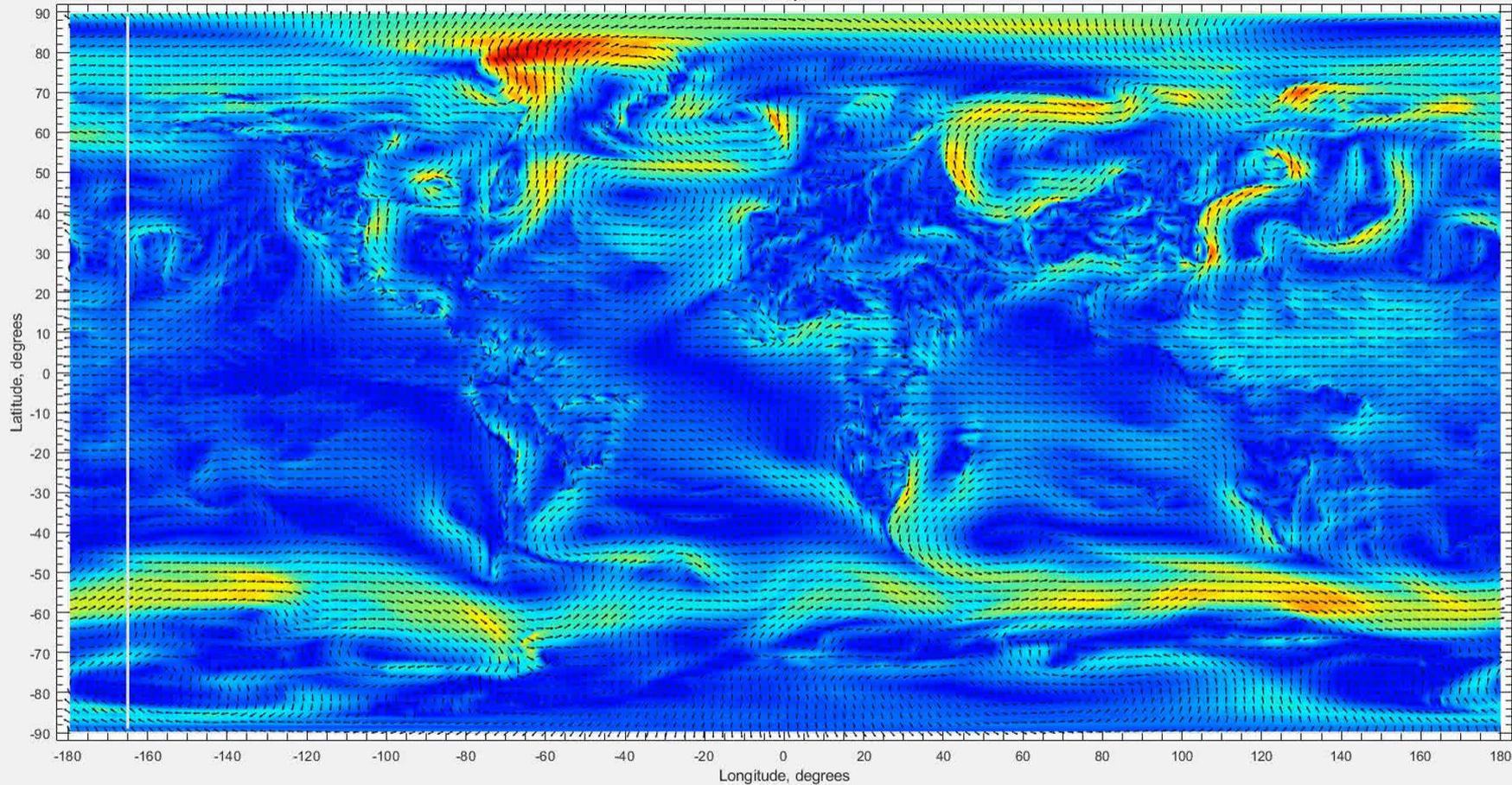
# Результаты моделирования

Начальные условия для моделирования были следующие. Скорость ветра во всей области моделирования была равна нулю, а распределения плотности и температуры воздуха были заданы по эмпирической модели NRLMSISE-00 для 16 января UT 12:00 и спокойных геофизических условий.

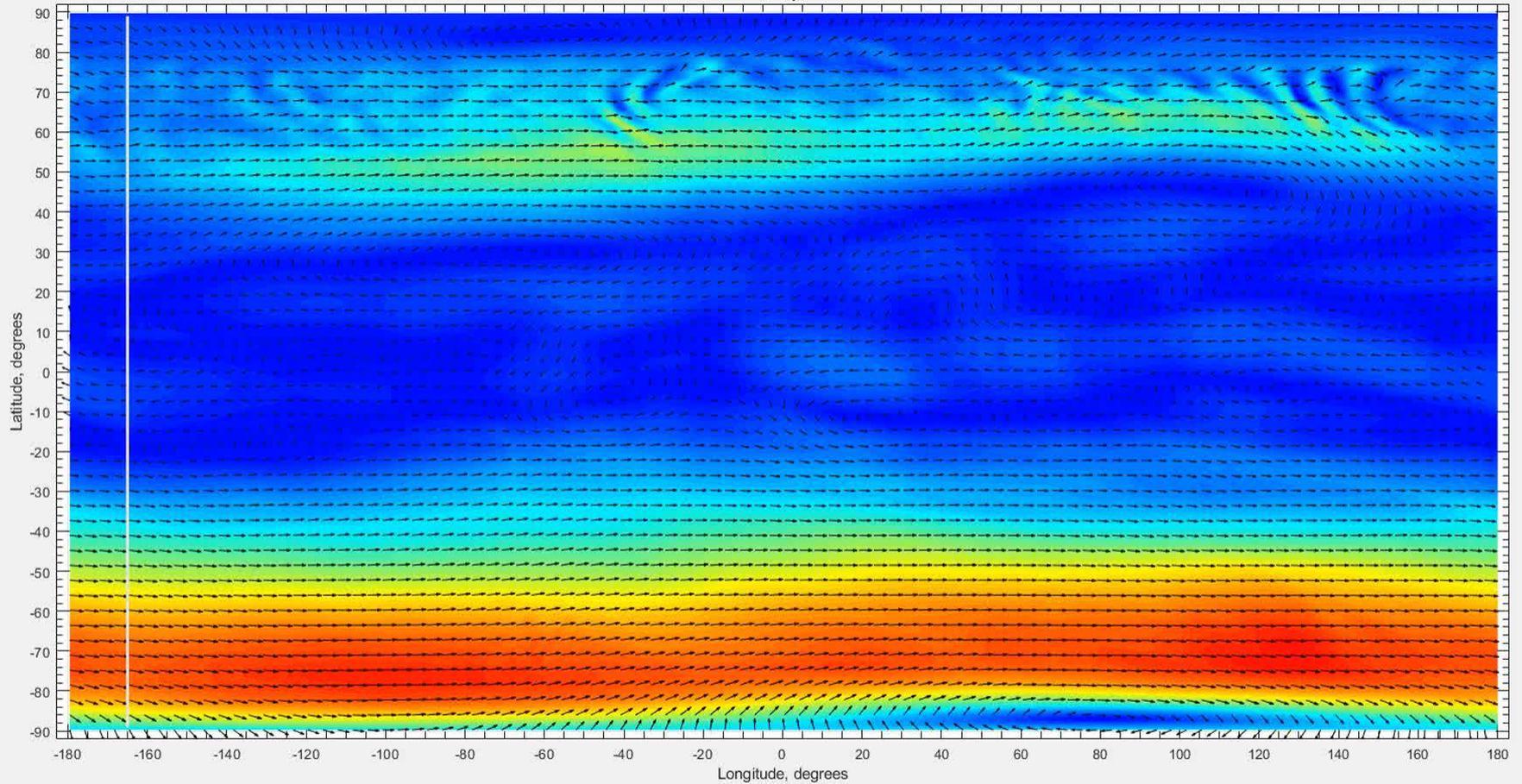
В результате моделирования установился приблизительно периодический режим циркуляции атмосферы, в котором на осредненное стационарное течение наложены различные колебания с периодами, как правило, не более суток. Амплитуда этих колебаний горизонтальной составляющей ветра сравнима с местной скоростью осредненного течения только в вихревых следах, возникающих в нижней тропосфере при обтекании горных массивов горизонтальным крупномасштабным потоком. В остальных местах эта амплитуда не превышает 20% от местной скоростью осредненного течения. В нижней тропосфере над океанами сформировались ячейки циркуляции Хедли, Ферреля и приполюсные ячейки.

**На следующих слайдах представлены распределения различных компонент скорости ветра и температуры.**

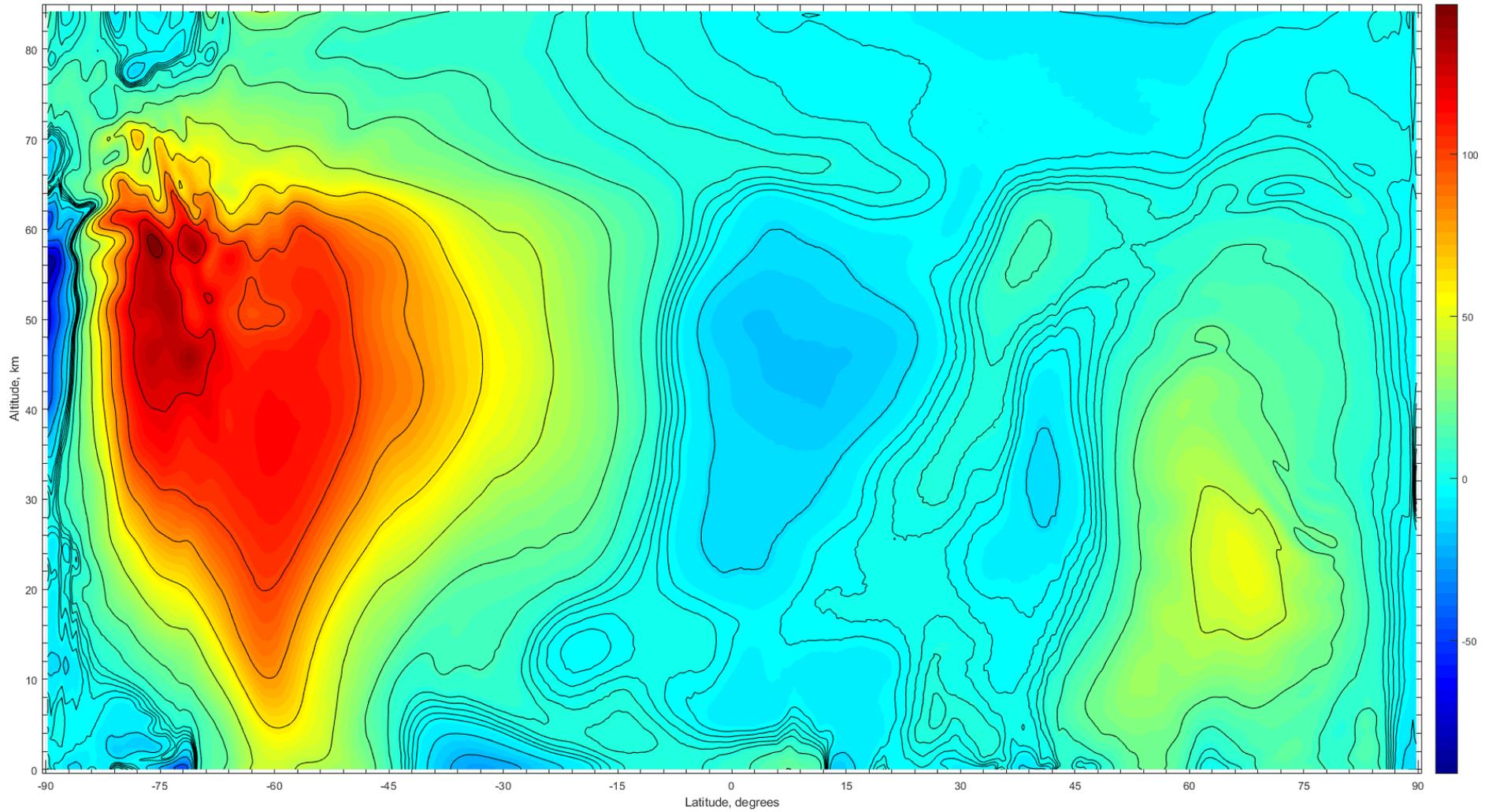
Horizontal wind at 400m  
27 Apr



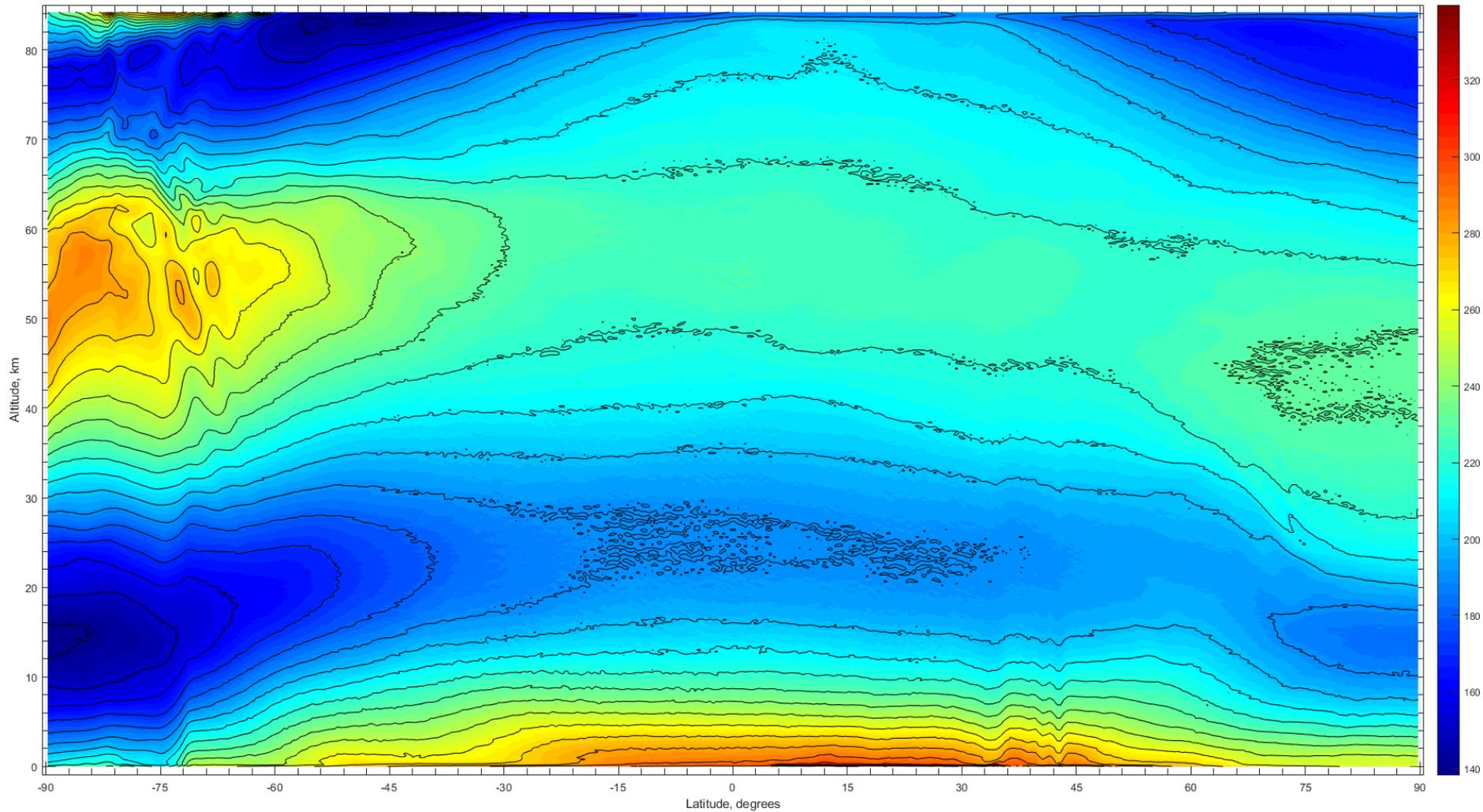
Horizontal wind at 50km  
27 Apr



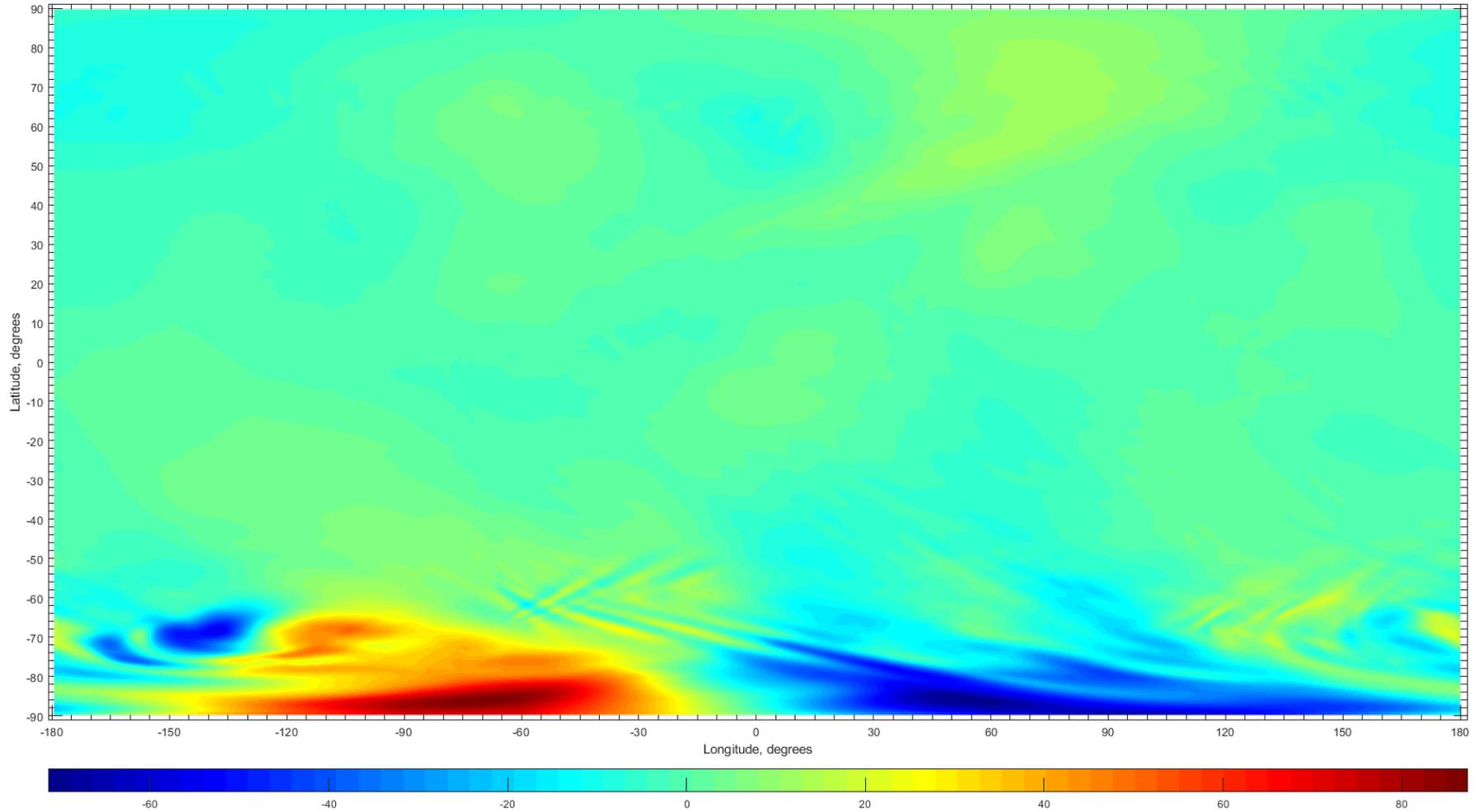
Zonal velocity at longitude 0°  
11 Jun



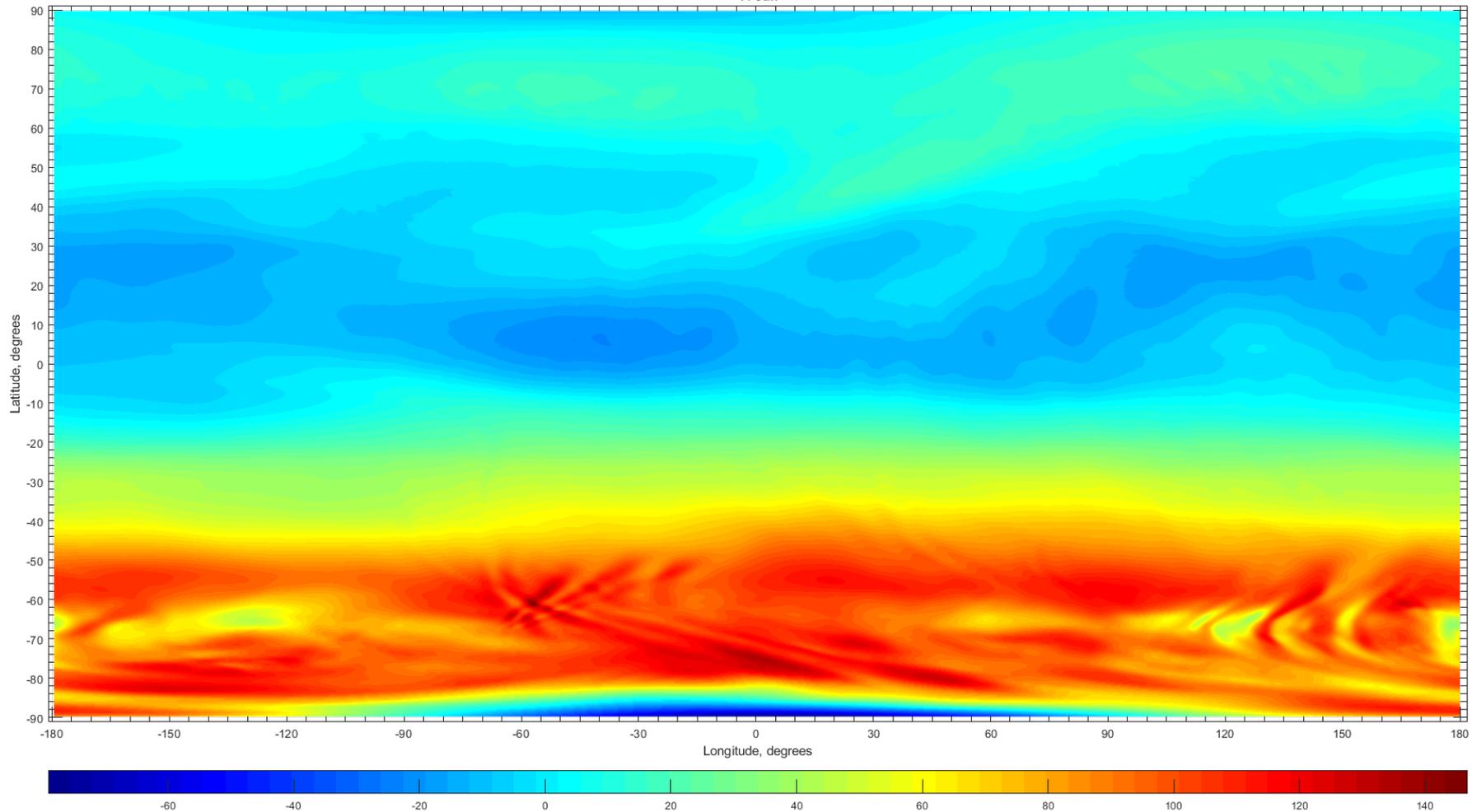
Temperature at longitude 0°  
11 Jun



Meridional wind at 54 km  
11 Jun



Zonal wind at 54 km  
11 Jun



# Выводы

Одним из результатов является наличие над океанами приземных ячеек меридионально-вертикальной циркуляции. В южном полушарии получились три ячейки: Приполюсная, Ферреля и Хедли, верхние границы которых лежат на разных высотах. В северном полушарии, над Тихим и Атлантическим океанами хорошо выражены ячейки Ферреля и Хедли, а Приполюсная ячейка выражена слабее. Континентальные горные системы разрушают эти ячейки. Важным результатом моделирования является наличие крупномасштабных вихрей и сдвиговых течений в нижней и средней атмосфере, которые играют важную роль.

Другим важным результатом моделирования являются циркумполярные вихри в обоих полушариях с противоположным направлением зональной компоненты ветра. Эти вихри обусловлены тем, что на высотах от 10 до 70 км в каждом полушарии возникают ячейки циркуляции в меридиональном и вертикальном направлении, в которых воздушные массы на одних высотах перемещаются от полюсов к экватору, а на других в обратном направлении. Действие силы Кориолиса при таких перемещениях создает зональные течения с большой скоростью ветра.

Повышение температуры в верхней части стратосферы и нижней мезосферы в полярной области зимнего полушария по отношению области средних широт и летней полярной области возникает из-за динамического сжатия горизонтального потока, который стекается к центру циркумполярного вихря, расположенного вблизи Южного полюса.

Представленные результаты моделирования показали, что разработанная авторами модель воспроизводит важные особенности циркуляции атмосферы Земли, такие как приземные ячейки меридионально-вертикальной циркуляции над океанами, крупномасштабные вихри, горные подветренные волны, подъем тропопаузы над зимней полярной областью, циркумполярные вихри и потепление в верхней части стратосферы и нижней мезосферы в полярной области зимнего полушария.