

**Особенности общей циркуляции средней атмосферы  
в разные сезоны.**

**Результаты численного моделирования**

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

*Полярный геофизический институт*

В докладе обсуждаются результаты численного моделирования общей циркуляции атмосферы Земли в диапазоне высот 0-80 км для условий января и июля, полученные с помощью газодинамической модели с полноценным учетом радиационного нагрева-выхолаживания воздуха.

Анализируются влияние зональных течений в нижней тропосфере над Тихим океаном, набегающих на горные массивы Анды и Кордильеры, на вертикальный перенос в средней и верхней атмосфере. Также анализируются особенности циркуляции в стратосфере и нижней мезосфере.

Показано, что разработанная авторами модель воспроизводит приземные ячейки циркуляции в меридиональном и вертикальном направлениях 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.

# 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.

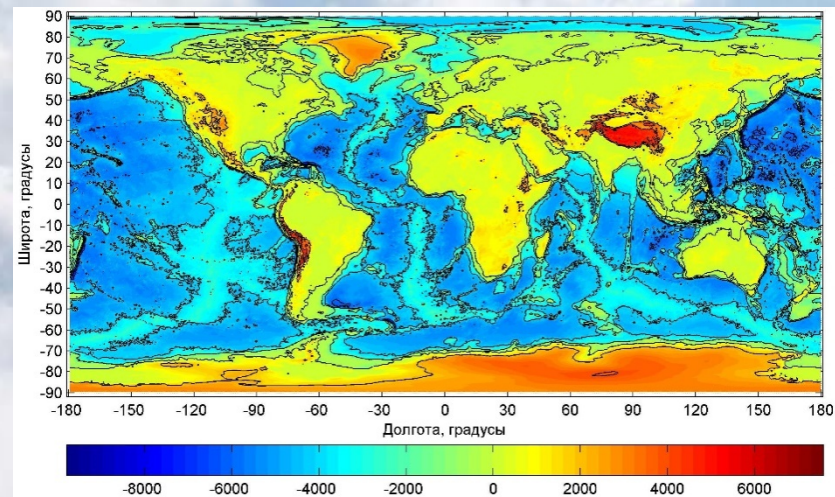
В модели учитывается несферичность земной поверхности и несферичность гравитационного поля Земли. Область моделирования простирается от поверхности Земли до сферы, центр которой совпадает с центром Земли.

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., Чететкин 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.

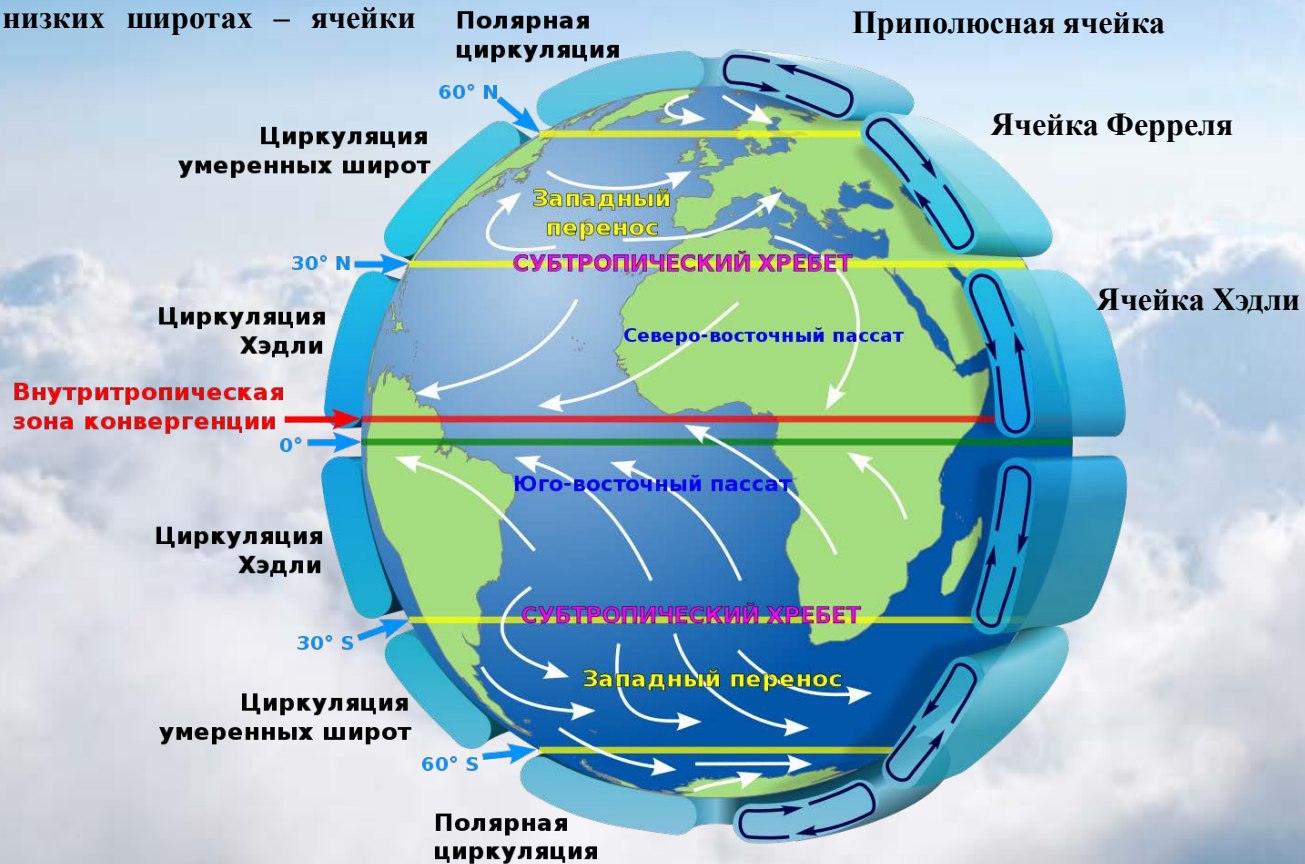
*Мингалев И.В., Федотова Е.А., Орлов К.Г.* Построение параметризаций молекулярного поглощения в нижней и средней атмосфере Земли в ИК-диапазоне // Оптика атмосферы и океана, 2018, том 31, № 10, с. 779-786

*Четверушкин Б.Н., Мингалев И.В., Федотова Е.А., Орлов К.Г., Чечеткин 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



Над океанами в нижней тропосфере регулярно возникают ячейки меридионально-вертикальной циркуляции, которая накладывается на перенос в зональном направлении. В полярных областях расположены приполюсные ячейки, на средних широтах — ячейки Ферреля, а на низких широтах — ячейки Хэдли.

В центре приполюсных ячеек воздушные массы опускаются к поверхности Земли, а затем движутся вдоль поверхности от полюсов к экватору. При этом у поверхности при удалении от полюсов увеличивается величина зональной компоненты ветра, которая направлена с востока на запад за счет действия силы Кориолиса. В районе границы между приполюсными ячейками и ячейками Ферреля движущиеся вдоль поверхности воздушные массы поднимаются вверх. Эту границу называют арктическим фронтом.



**В ячейках Ферреля воздушные массы движутся вдоль поверхности от экватора к полюсам, причем при их приближении к полюсам увеличивается величина компоненты ветра, которая за счет действия силы Кориолиса направлена с запада на восток. В районе границы между ячейками Ферреля и ячейками Хедли воздушные массы опускаются к поверхности Земли. Эту границу называют полярным фронтом, а также субтропическим поясом высокого давления.**

**В ячейках Хедли воздушные массы движутся вдоль поверхности от полюсов к экватору. Границей между ячейками Хедли является внутритропическая зона конвергенции (далее ВЗК). В этой зоне вдоль поверхности воздушные массы поднимаются вверх. Когда ячейки Хедли расположены примерно симметрично относительно экватора, то в каждой из них при движении воздушных масс в приповерхностном слое от полярного фронта к экватору увеличивается величина зональной компоненты ветра, которая за счет действия силы Кориолиса направлена с востока на запад. Направленный с северо-востока на юго-запад ветер в приповерхностном слое в северной ячейке Хедли называют пассатом северного полушария, а направленный с юго-востока на северо-запад ветер в южной ячейке Хедли называют пассатом южного полушария.**

# 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 [19] для 16 января UT 12:00 и спокойных геофизических условий.

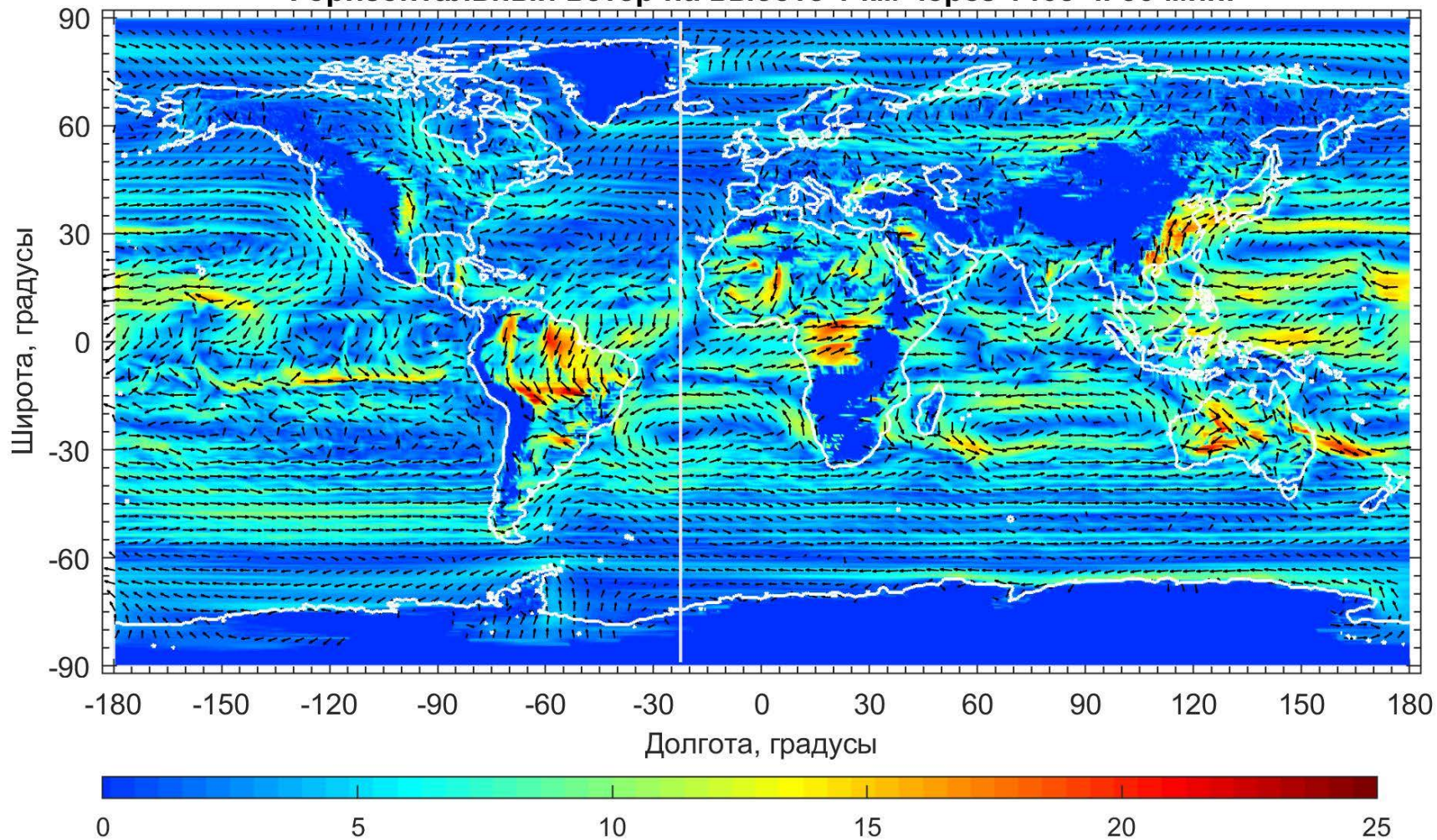
В ходе моделирования 61 раз повторялся суточный ход освещенности Земли Солнцем для периода с 16 по 17 января. В результате моделирования установился приближенно периодический режим циркуляции атмосферы, в котором на осредненное стационарное течение наложены различные колебания с периодами, как правило, 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 для момента времени 16 января UT 13:30.**



16  
января  
UT 13:30

### Горизонтальный ветер на высоте 1 км через 1465 ч. 30 мин.



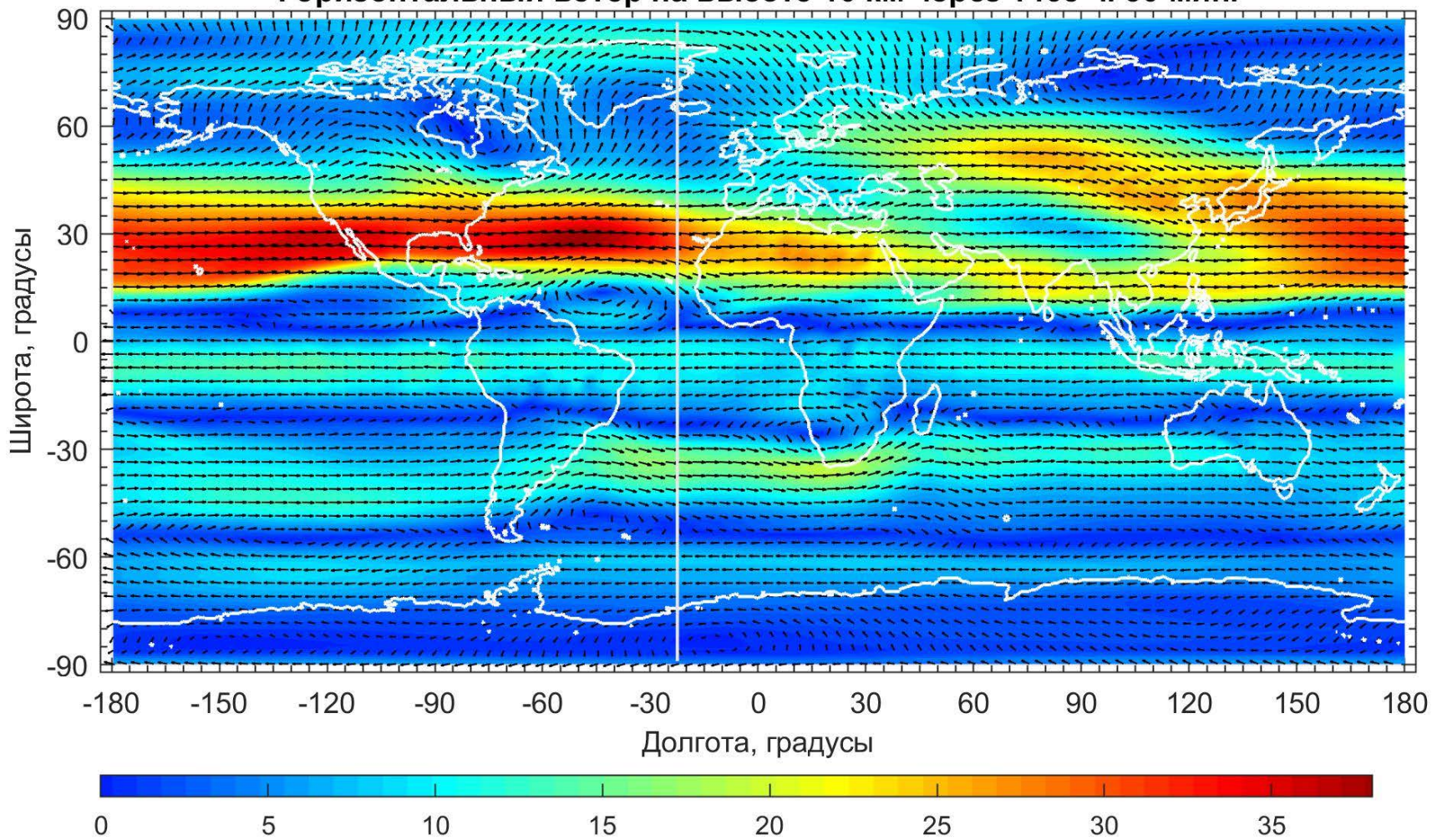
Видно, что на высоте 1 км над уровнем моря в южном полушарии на широтах от  $-85^{\circ}$  до примерно  $-62^{\circ}$  зональная компонента ветра направлена с востока на запад, а на широтах от  $-58^{\circ}$  до  $-30^{\circ}$  зональная компонента ветра направлена с запада на восток, и что на широтах от  $-62^{\circ}$  до  $-58^{\circ}$  существует течение со сдвигом горизонтального ветра, которое разделяет приполюсную ячейку циркуляции и ячейку Ферреля, и которое принято называть южным арктическим фронтом. Также видно, что на северной границе южной ячейки Ферреля имеются три крупных антициклонических вихря. Первый из них расположен над южной Атлантикой с центром в точке с широтой примерно  $-25^{\circ}$  и долготой  $-23^{\circ}$  и имеет диаметр примерно 2600-2700 км. Второй из них расположен над Индийским океаном с центром в точке с широтой примерно  $-25^{\circ}$  и долготой  $73^{\circ}$  и имеет диаметр примерно 2500-2600 км. Третий из этих вихрей расположен над Тихим океаном с центром в точке с широтой примерно  $-23^{\circ}$  и долготой  $170^{\circ}$  и имеет диаметр примерно 2100-2200 км.

Видно, что в северном полушарии над Тихим океаном на широтах от  $28^{\circ}$  до  $55^{\circ}$  имеется течение, направленное с запада на восток. Это течение является нижней частью ячейки Ферреля. Проходя над Тихим океаном это течение упирается в горный массив Кордильеры и поворачивает на юго-восток, а затем на широтах от  $15^{\circ}$  до  $20^{\circ}$  оно разделяется на две части. Первая часть его разворачивается на запад, вливаясь в зональный поток нижней части северной ячейки Хедли, который проходит с востока на запад через весь Тихий океан и разворачивается на север, а затем и на восток, проходя над Южно-китайским морем и Западным Китаем. Вторая часть этого течения разворачивается на север, проходя над Центральной Америкой, а затем над территорией США встречается с течением из полярной области, проходящим восточнее горного массива Кордильеры. В районе встречи этих течений на широтах от  $35^{\circ}$  до  $50^{\circ}$  начинается направленное с запада на восток течение, которое над западной частью Атлантического океана расширяется, причем его северная часть поворачивает на северо-восток. Над северо-восточной Европой, Западной и Центральной Сибирью расположен большой циклонический вихрь. Над Аравийским морем и западной частью полуострова Индостан расположен антициклонический вихрь с центром в точке с широтой примерно  $15^{\circ}$  и долготой  $70^{\circ}$  и диаметром примерно 1500 км.



# Горизонтальный ветер на высоте 10 км через 1465 ч. 30 мин.

16  
января  
UT 13:30

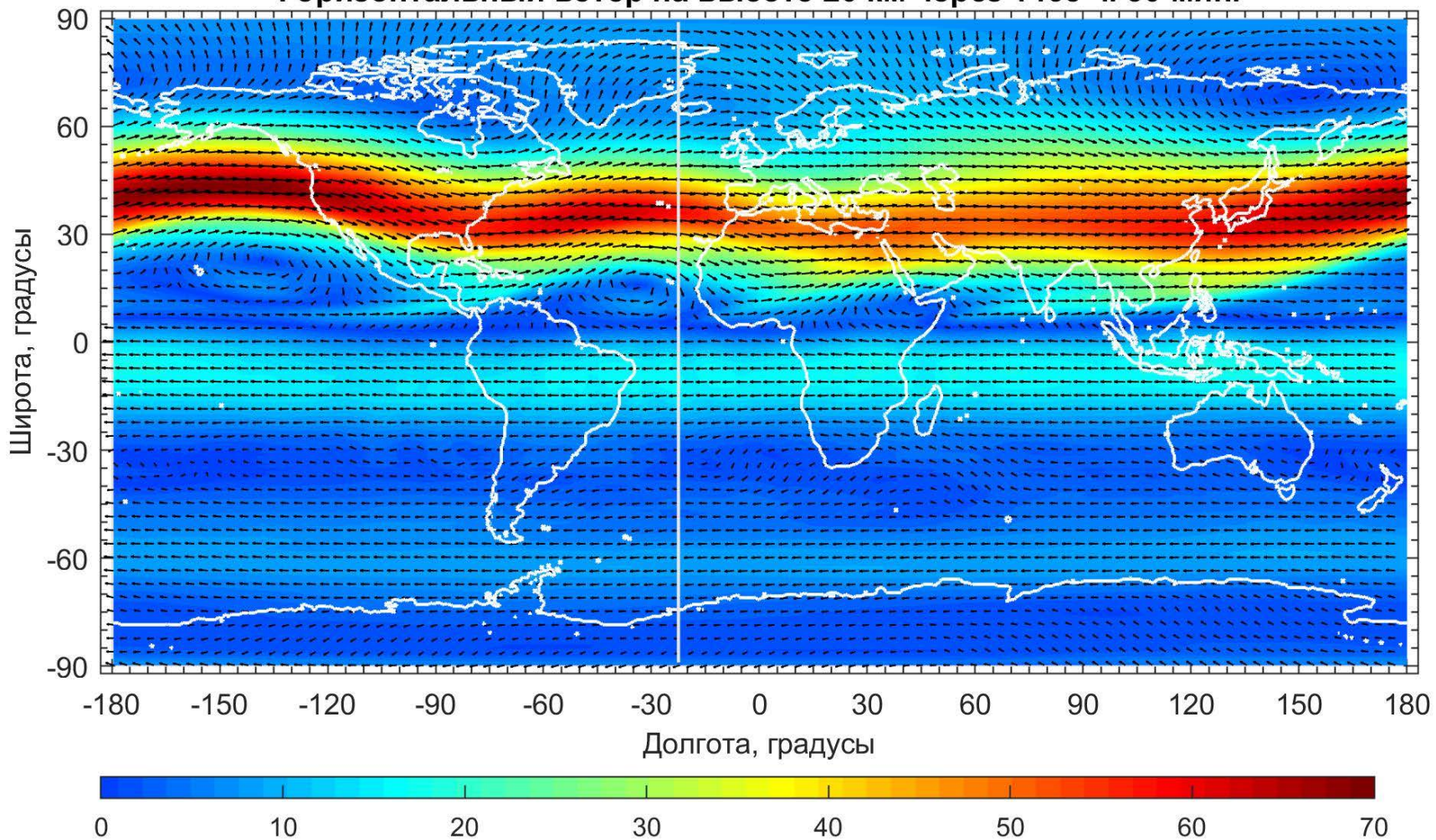




Видно, что на высоте 10 км над уровнем моря в южном полушарии на широтах от  $-85^\circ$  до примерно  $-55^\circ$  зональная компонента ветра направлена с востока на запад, а на широтах от  $-50^\circ$  до примерно  $-30^\circ$  зональная компонента ветра направлена с запада на восток. Между двумя этими областями имеется сдвиговое течение, прерываемое крупномасштабным вихрем с центром в точке с широтой примерно  $-50^\circ$  и долготой примерно  $-45^\circ$ . Видно, что на широтах от  $-20^\circ$  до примерно  $0^\circ$  зональная компонента ветра снова направлена с востока на запад. Между этой областью и лежащей южнее областью с противоположным направлением горизонтального ветра расположено сдвиговое течение, прерываемое крупномасштабным вихрем с центром в точке с широтой примерно  $-25^\circ$  и долготой примерно  $20^\circ$ . Севернее экватора расположено сдвиговое течение, прерываемое крупномасштабным антициклоническим вихрем с центром в точке с широтой примерно  $12^\circ$  и долготой примерно  $-42^\circ$ . Севернее сдвигового течения над Тихим океаном, Северной Америкой и Атлантическим океаном на широтах от  $10^\circ$  до примерно  $50^\circ$  расположено направленное с запада на восток течение, в котором величина скорости ветра достигает от 20 до 38 м/с. При дальнейшем движении на восток это течение расширяется над Евразией и замедляется над Гималаями и Тибетом, а затем сужается при приближении к Тихому океану. Описанные особенности распределения горизонтальной компоненты ветра на высоте 10 км означают, что поверхность, проведенная на этой высоте над уровнем океана, пересекает три ячейки меридионально-вертикальной циркуляции, расположенные в южном полушарии, и пересекает только одну ячейку в северном полушарии.

Горизонтальный ветер на высоте 20 км через 1465 ч. 30 мин.

16  
января  
UT 13:30



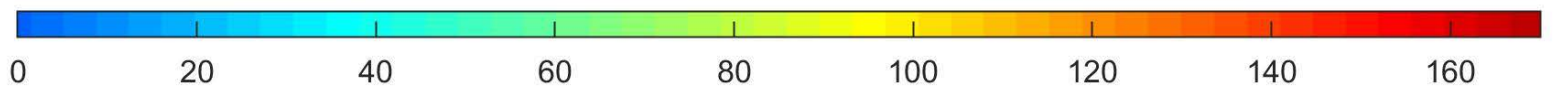
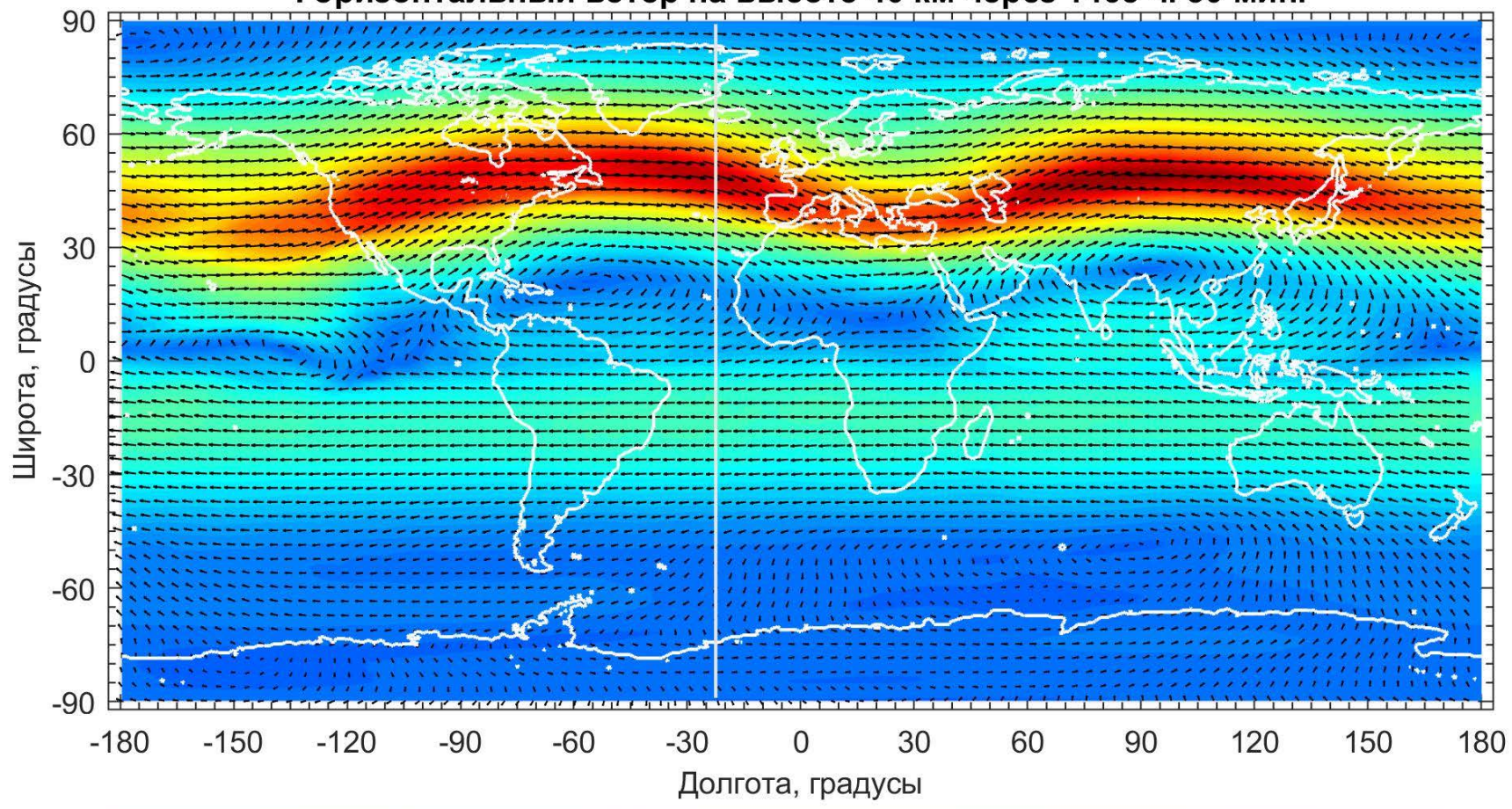


Видно, что на высоте 20 км над уровнем моря в южном полушарии горизонтальная компонента ветра направлена с востока на запад с небольшими отклонениями в отдельных областях. Севернее экватора на широтах примерно от 5° до 10° расположено сдвиговое течение, прерываемое тремя крупномасштабными антициклоническими вихрями, первый из которых расположен над западной частью Тихого океана, второй – над центральной частью Атлантического океана, а третий - над западным побережьем Африки, Красным морем и южной частью Аравийского полуострова. Севернее сдвигового течения и указанных вихрей расположено течение, направленное преимущественно с запада на восток. В этом течении абсолютная величина скорости ветра достигает 60-70 м/с.



# Горизонтальный ветер на высоте 40 км через 1465 ч. 30 мин.

16  
января  
UT 13:30

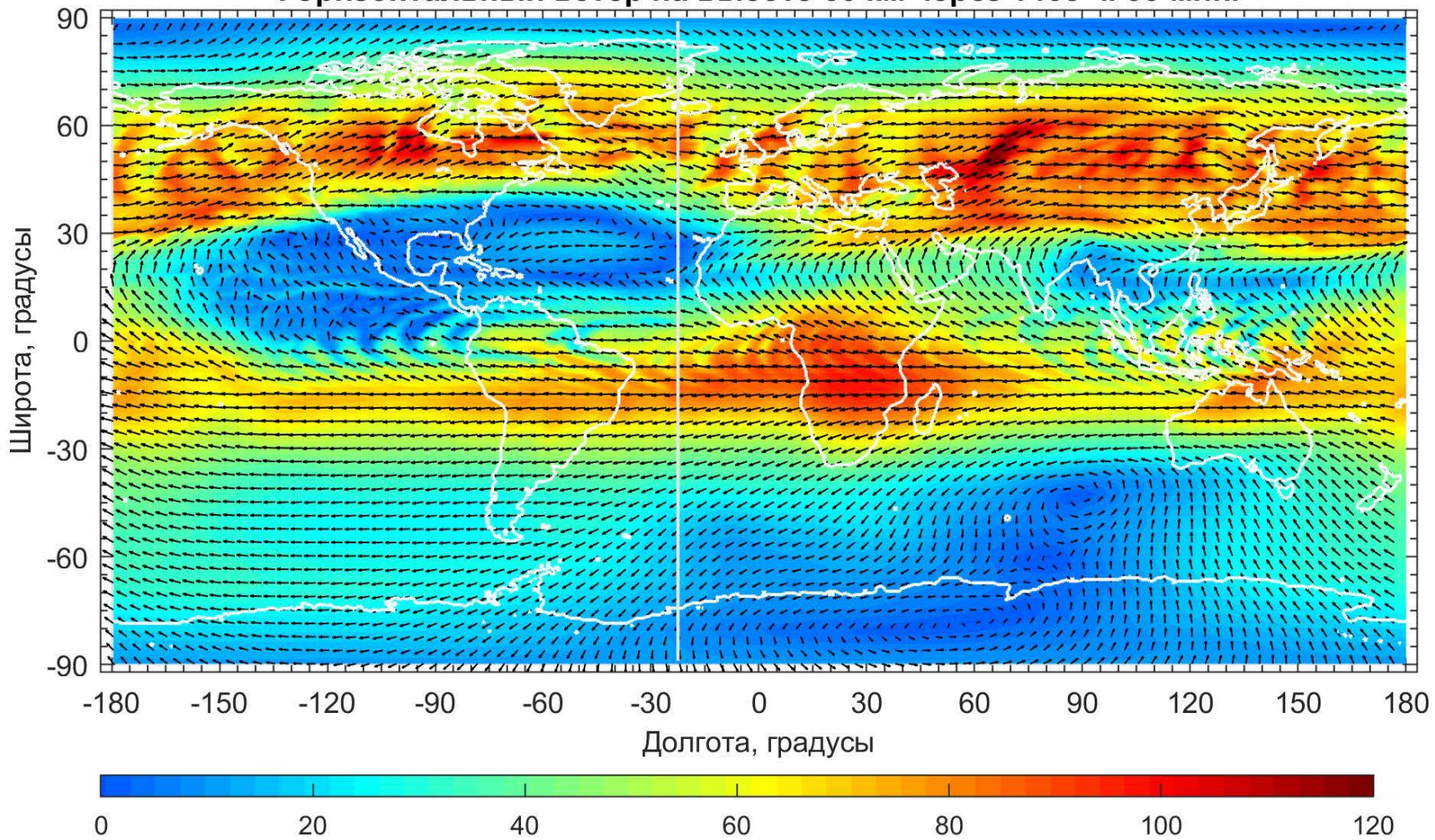


Видно, что на высоте 40 км над уровнем моря распределение горизонтальной компоненты ветра во многом качественно подобно распределению на высоте 20 км. В южном полушарии горизонтальная компонента ветра направлена с востока на запад, причем на широтах от  $-25^{\circ}$  до  $-5^{\circ}$  абсолютная величина скорости ветра достигает 50-55 м/с. Севернее экватора на широтах примерно от  $0^{\circ}$  до  $25^{\circ}$  расположена переходная зона, в которой имеется два крупных антициклонических вихря, центры которых расположены в точках с долготами примерно  $-60^{\circ}$  и  $95^{\circ}$ , а третий вихрь меньшего размера с центром на долготе  $-130^{\circ}$ . Севернее переходной зоны на широтах от  $20^{\circ}$  до  $70^{\circ}$  расположено опоясывающее Землю и изгибающееся течение, направленное преимущественно с запада на восток, в этом течении абсолютная величина скорости ветра достигает 160-180 м/с.



Горизонтальный ветер на высоте 60 км через 1465 ч. 30 мин.

16  
января  
UT 13:30

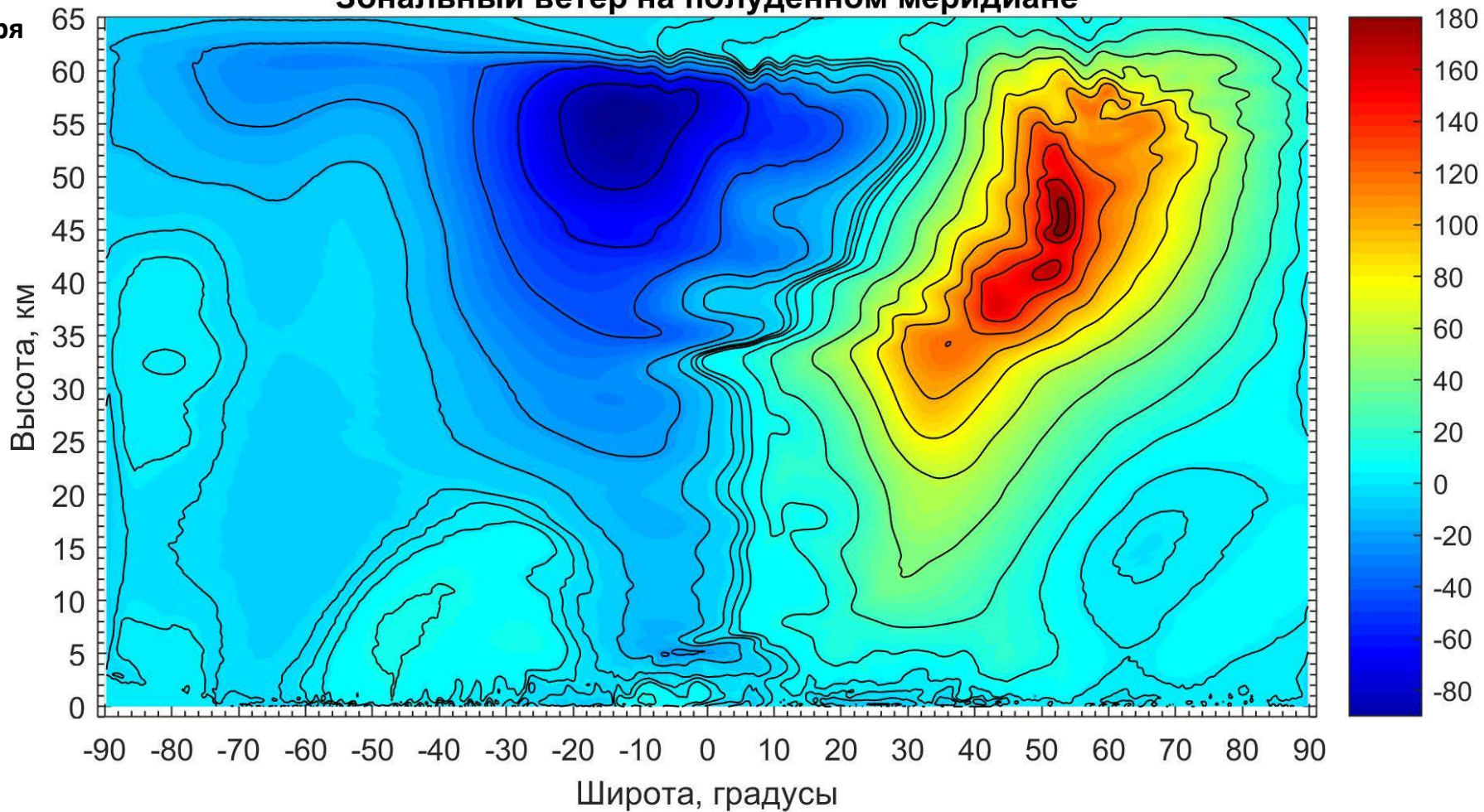




Видно, что на высоте 60 км над уровнем моря распределение горизонтальной компоненты ветра качественно подобно распределению на высоте 40 км, но отличается от последнего тем, что в южном полушарии горизонтальная компонента ветра направлена с востока на запад, причем на широтах от  $-35^{\circ}$  до  $0^{\circ}$  скорость ветра достигает значений 75-90 м/с, а в расположенном в северном полушарии на широтах от  $20^{\circ}$  до  $75^{\circ}$  опоясывающем Землю и изгибающемся течении, направленном преимущественно с запада на восток, скорость ветра достигает значений 110-120 м/с. Таким образом, на высотах от 20 до 60 км в южном полушарии имеется циркумполярное вихревое движение, направленное с востока на запад, а в северном полушарии имеется циркумполярное вихревое движение, направленное с запада на восток.

16  
января  
UT  
13:30

### Зональный ветер на полуденном меридиане

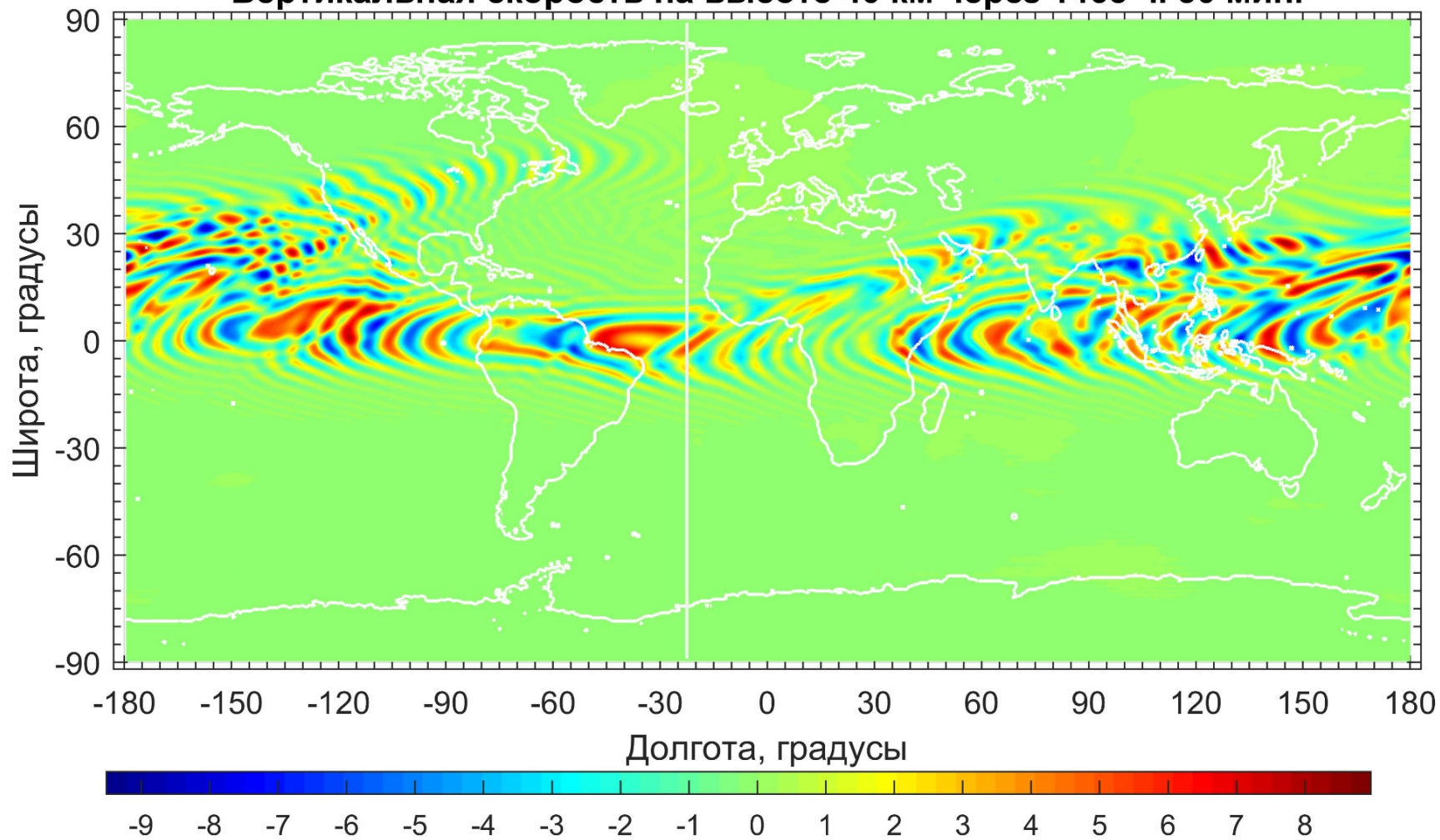


Видно, что в южном полушарии на высотах от 20 до 65 км имеется циркумполярное движение атмосферы, направленное с востока на запад, а на высотах от 0 до 20 км на средних широтах от  $-57^{\circ}$  до  $25^{\circ}$  это движение направлено с запада на восток. В северном полушарии на высотах от 3 до 65 км имеется циркумполярное движение атмосферы, направленное с запада на восток. Максимальная скорость зонального ветра в циркумполярном вихре южного полушария достигается в диапазоне широт от  $-25^{\circ}$  до  $0^{\circ}$  на высотах от 52 до 63 км и по величине превышает 85 м/с, а в циркумполярном вихре северного полушария эта скорость достигается в диапазоне широт от  $35^{\circ}$  до  $60^{\circ}$  на высотах от 33 до 53 км и по величине превышает 175 м/с. Видно, что граница между южным и северным циркумполярными вихрями на высотах от 10 до 27 км находится примерно на одной широте, а на высотах от 27 до 69 км при увеличении высоты эта граница смещается на север более чем на 1000 км.



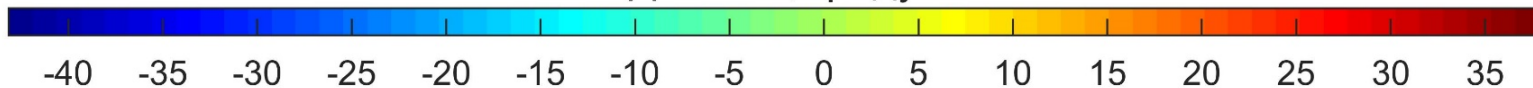
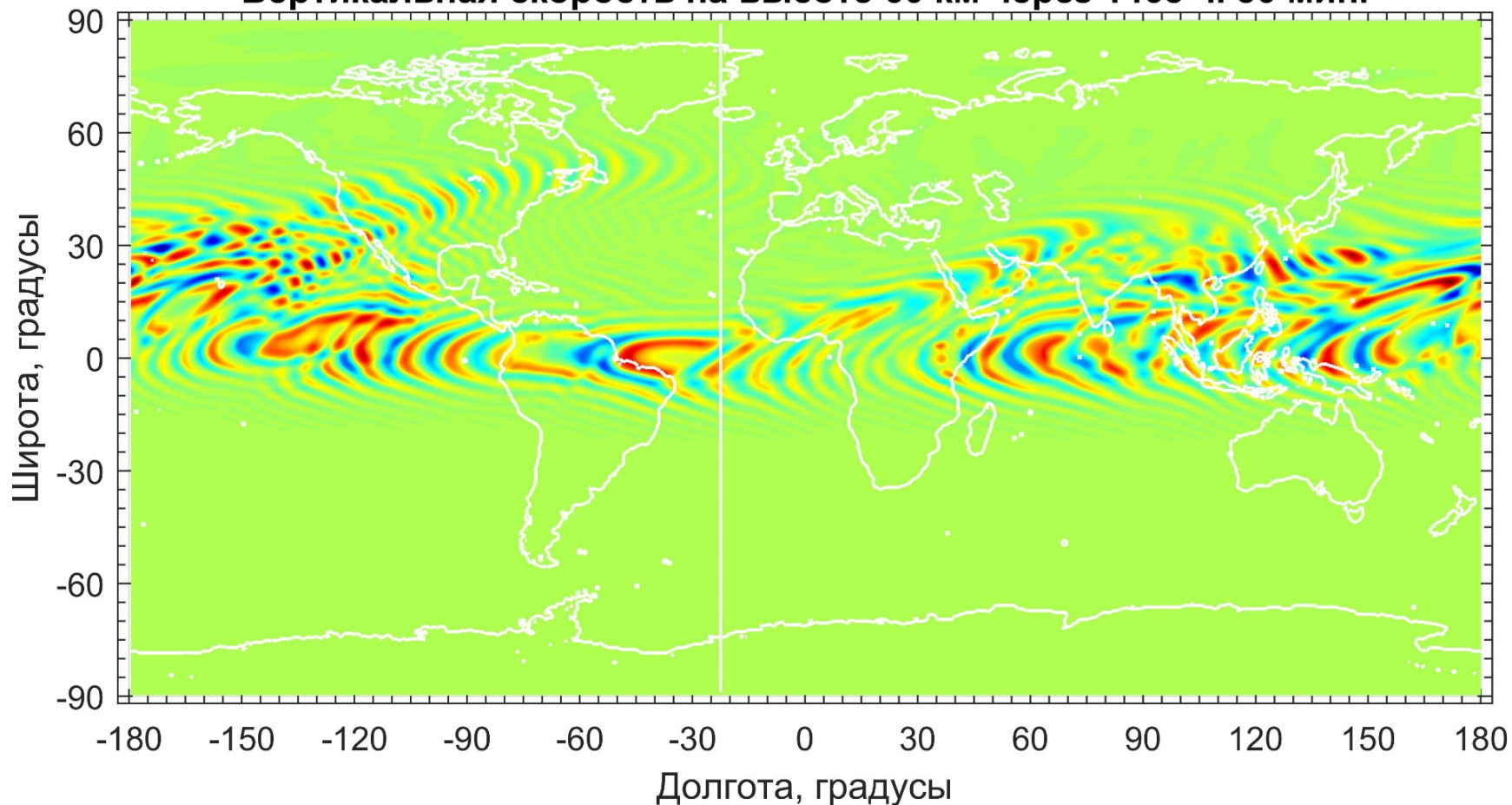
# Вертикальная скорость на высоте 40 км через 1465 ч. 30 мин.

16  
января  
UT 13:30



# Вертикальная скорость на высоте 60 км через 1465 ч. 30 мин.

16  
января  
UT 13:30



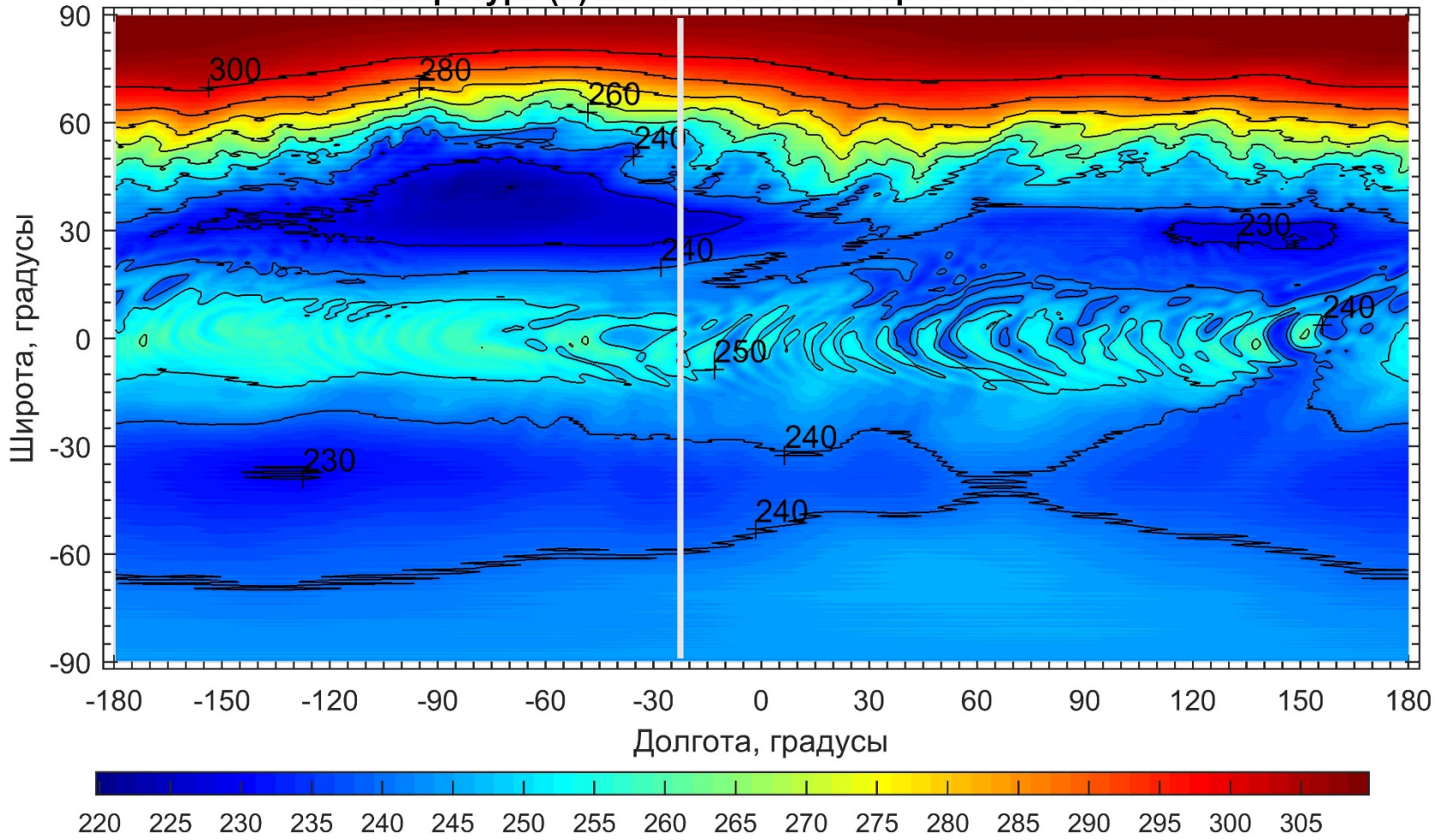
Видно, что на высоте 40 км над уровнем моря распределение вертикальной компоненты ветра имеет следующие особенности. На широтах от  $-15^{\circ}$  до  $60^{\circ}$  имеется область, где чередуются изогнутые полосы и пятна, в которых вертикальная компонента ветра достигает значений от  $-9$  до  $9$  м/с. Эта область опоясывает Землю и раздваивается над Америками и Атлантическим океаном. Вне этой области величина вертикальной компоненты ветра не превышает  $0,7$  м/с. Видно, что на высоте 60 км над уровнем моря распределение вертикальной компоненты ветра имеет те же особенности, что и на высоте 40 км, и отличается только тем, что в чередующихся изогнутых полосах и пятнах вертикальная компонента ветра достигает значений от  $-42$  до  $38$  м/с, абсолютная величина которых существенно больше, чем на высоте 40 км.

Также получилось, что на высотах 10, 20 и 30 км над уровнем моря распределение вертикальной компоненты ветра имеет те же особенности, что и на высоте 40 км, и отличается только тем, что в чередующихся изогнутых полосах и пятнах вертикальная компонента ветра достигает значений, абсолютная величина которых существенно меньше, чем на высоте 40 км.

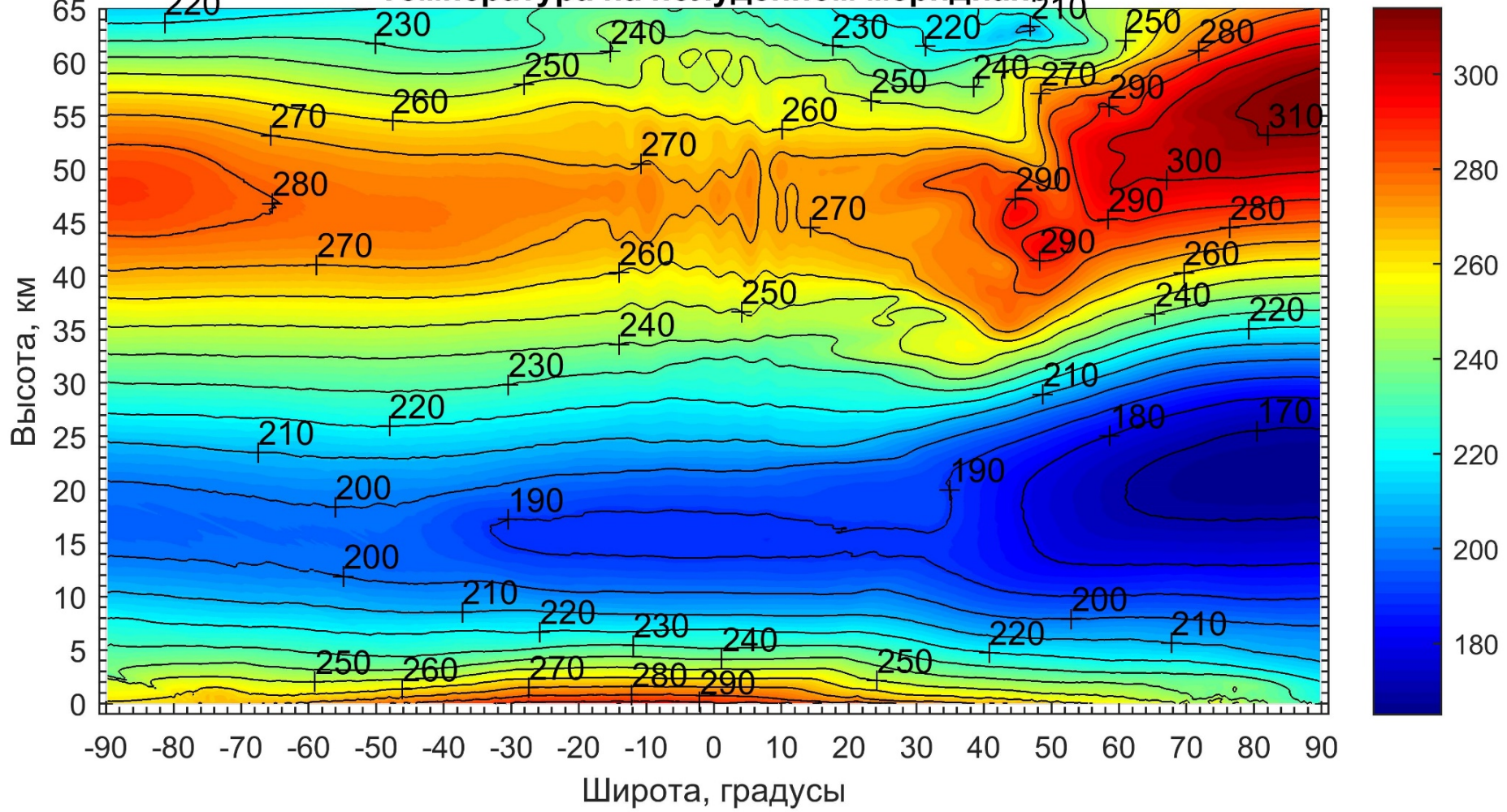


16  
января  
UT 13:30

Температура (К) на высоте 60 км через 1465 ч. 30 мин.



# Температура на полуденном меридиане





Видно, что на высоте 60 км над уровнем моря максимальная температура около 310 К достигается в районе северного полюса. Минимальная температура 220-230 К достигается в северном полушарии на средних широтах в тех областях на южной границе северного циркумполярного вихря, где горизонтальный поток имеет наибольшую скорость (см. рис. 4). Южнее  $-30^{\circ}$  температура лежит в пределах 230-245 К и не имеет существенных горизонтальных неоднородностей. Также видно, что в областях, где чередуются изогнутые полосы и пятна, в которых вертикальная компонента ветра достигает больших значений, имеются горизонтальные неоднородности температуры, в которых она меняется в пределах от 235 до 265 К.

Видно, что высота тропопаузы в зимней полярной области в северном полушарии составляет 21-22 км, что выше, чем эта высота над экватором и в летнем южном полушарии, где она составляет 17-18 км. Такая особенность соответствует данным наблюдений. Также видно, что на высотах более 50 км в северном полушарии температура в приполюсной области на 30-50 К выше, чем на средних широтах  $45-50^{\circ}$ . Таким образом, в рассчитанной циркуляции атмосферы верхняя стратосфера и нижняя мезосфера зимнего полушария в полярной области существенно теплее чем на средних широтах.

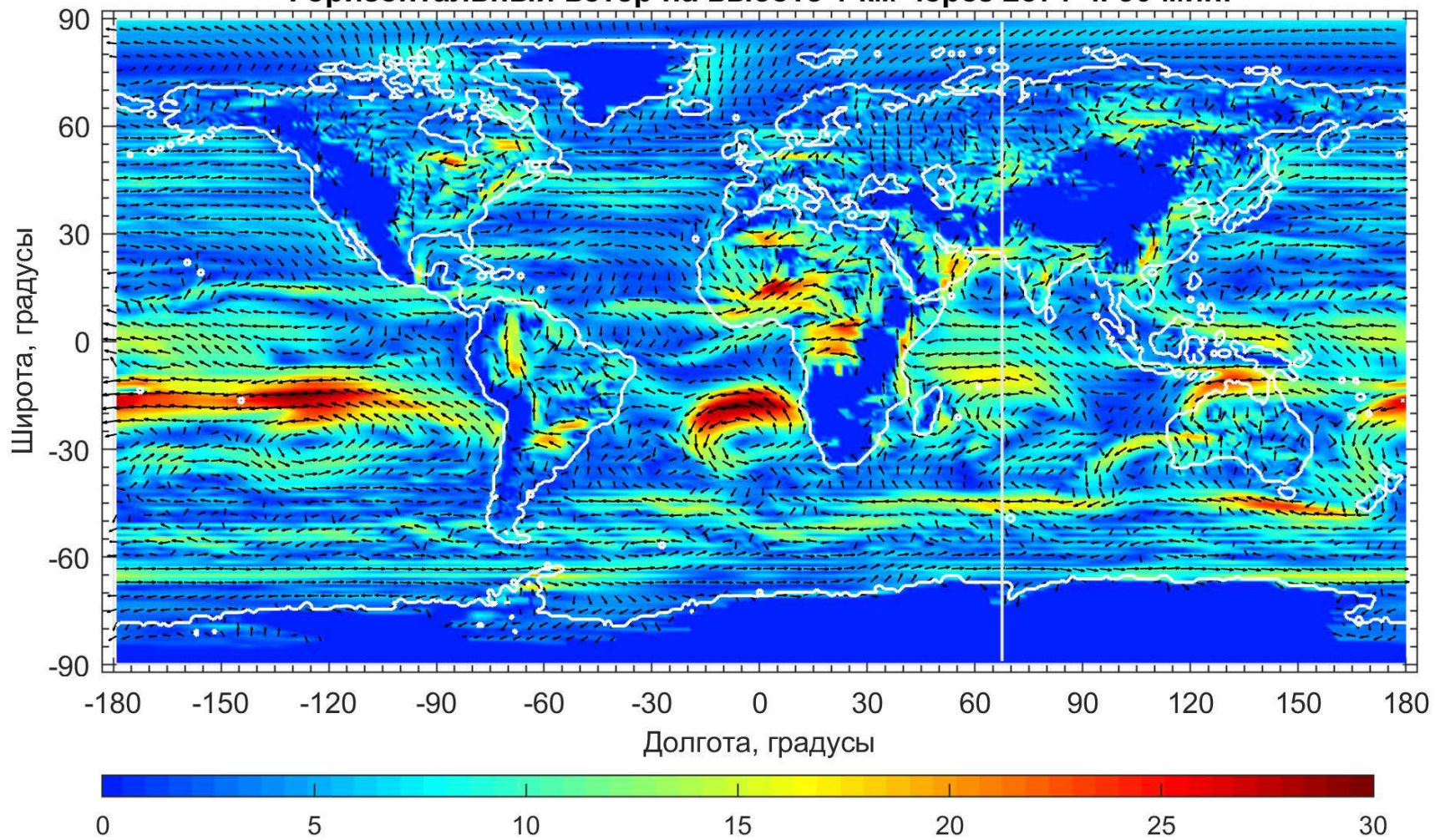
**На следующих слайдах представлены  
распределения различных компонент скорости  
ветра и температуры для момента времени 16  
июля UT 07:30.**





16  
июня  
UT 7:30

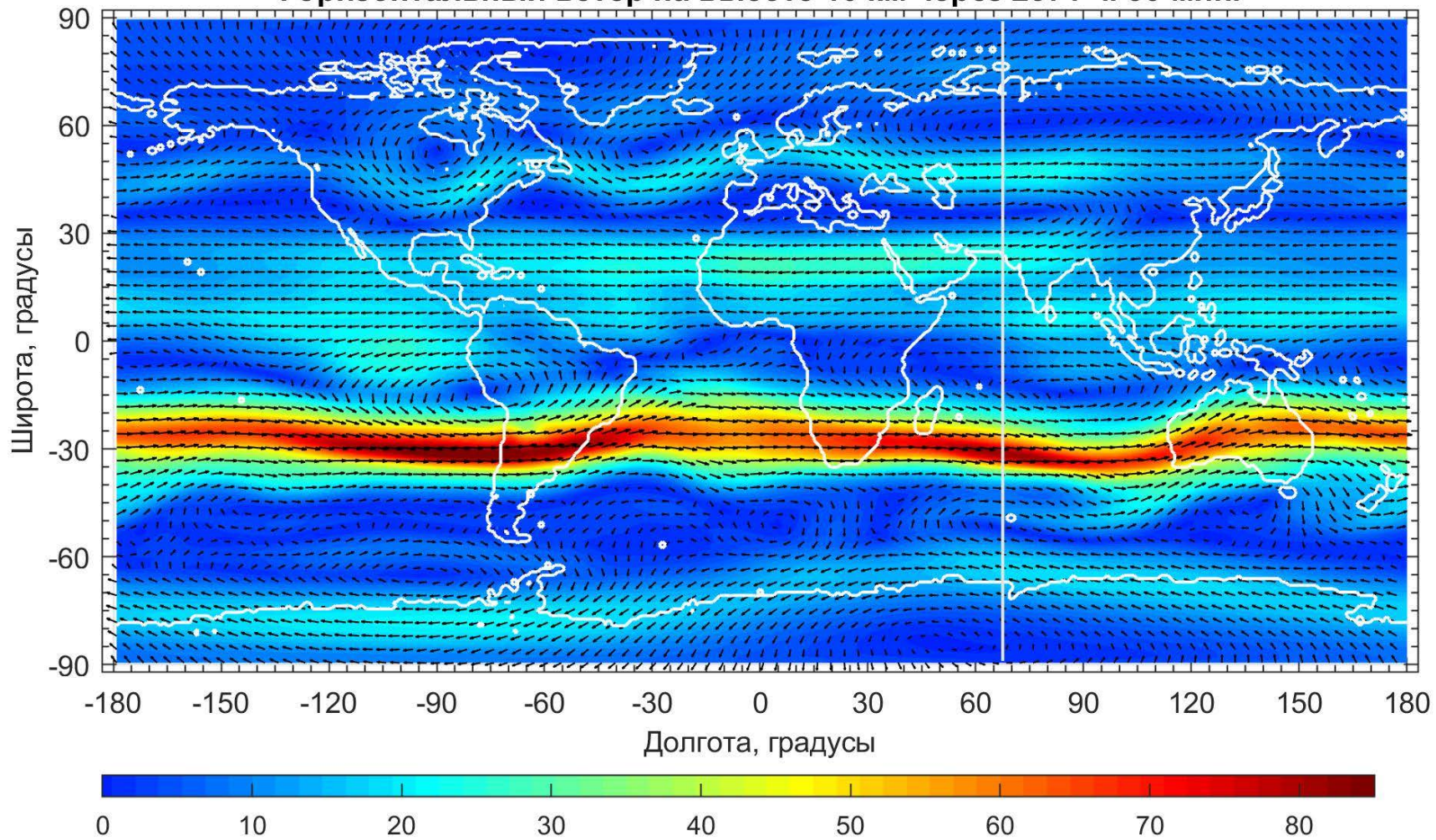
### Горизонтальный ветер на высоте 1 км через 2371 ч. 30 мин.





16  
июня  
UT 7:30

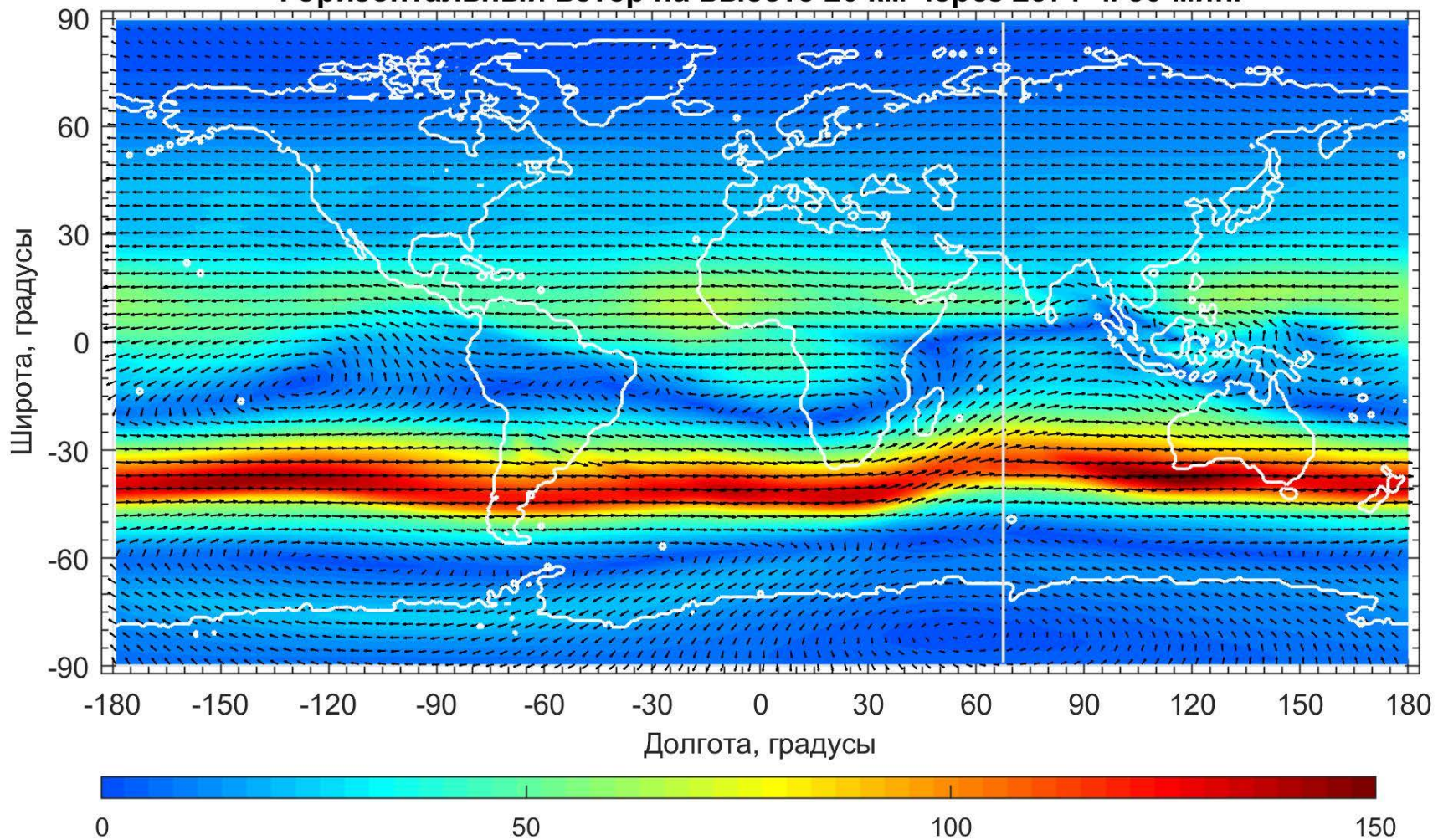
### Горизонтальный ветер на высоте 10 км через 2371 ч. 30 мин.





16  
июня  
UT 7:30

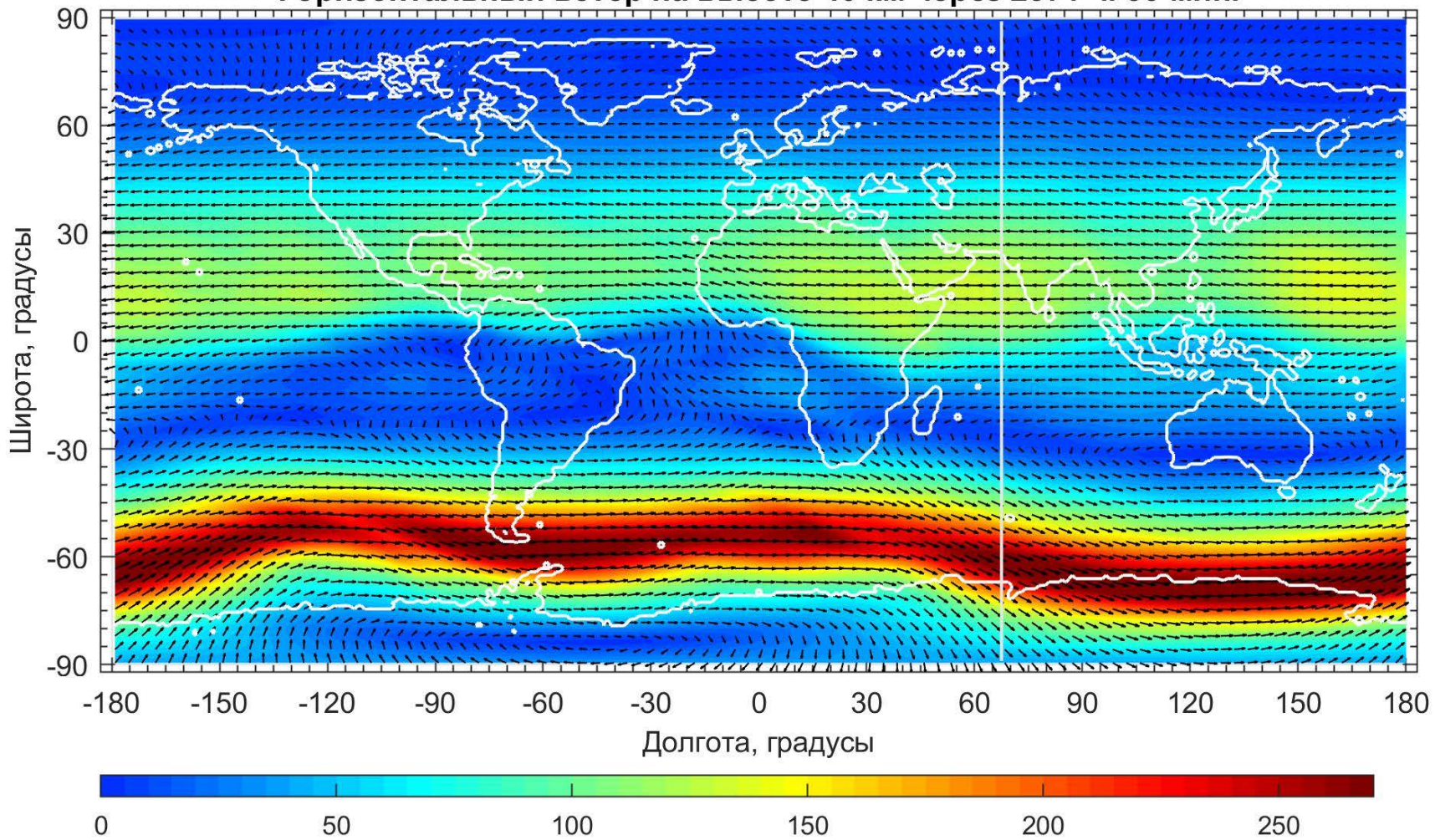
### Горизонтальный ветер на высоте 20 км через 2371 ч. 30 мин.





16  
июня  
УТ 7:30

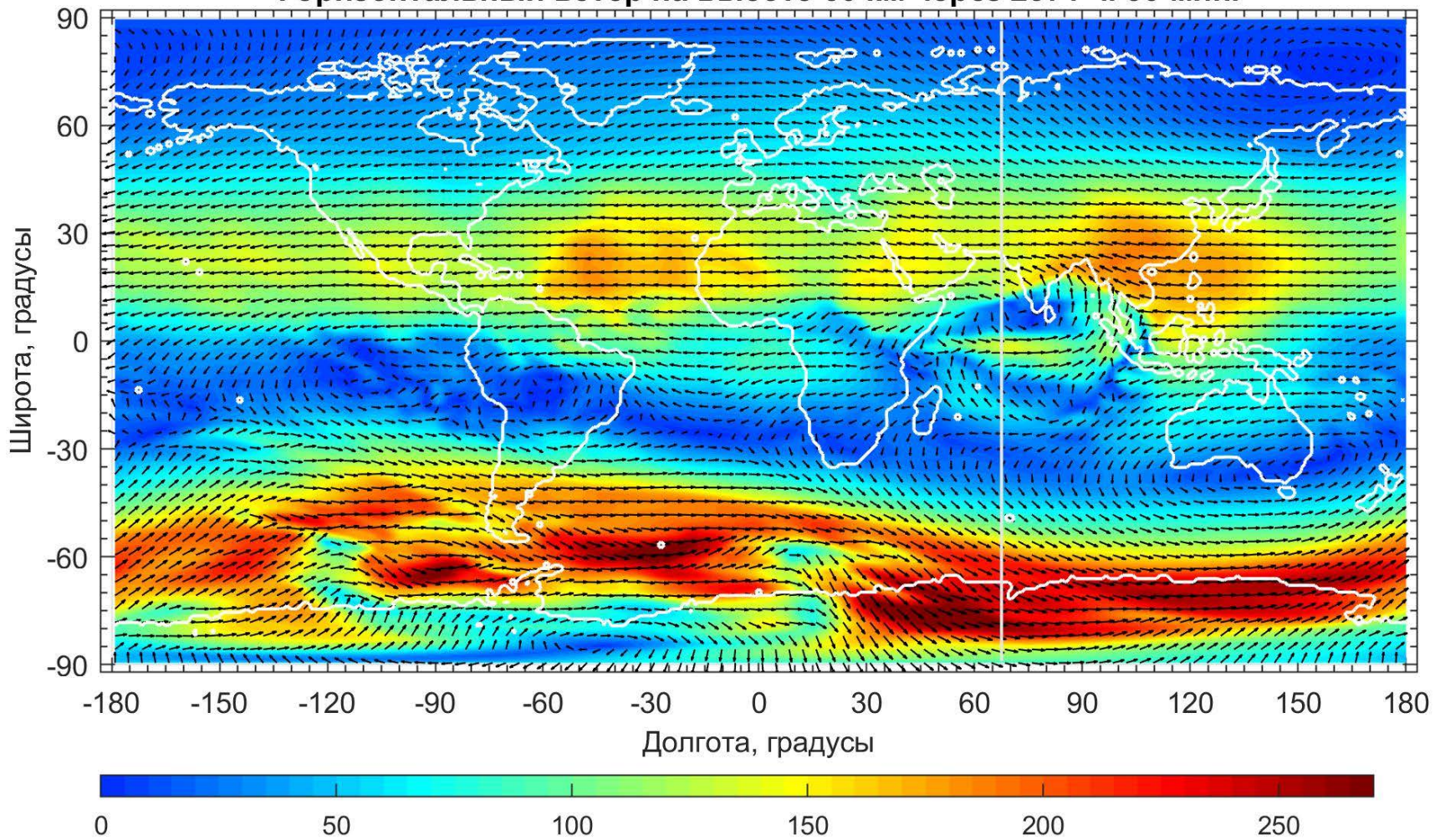
### Горизонтальный ветер на высоте 40 км через 2371 ч. 30 мин.





16  
июня  
UT 7:30

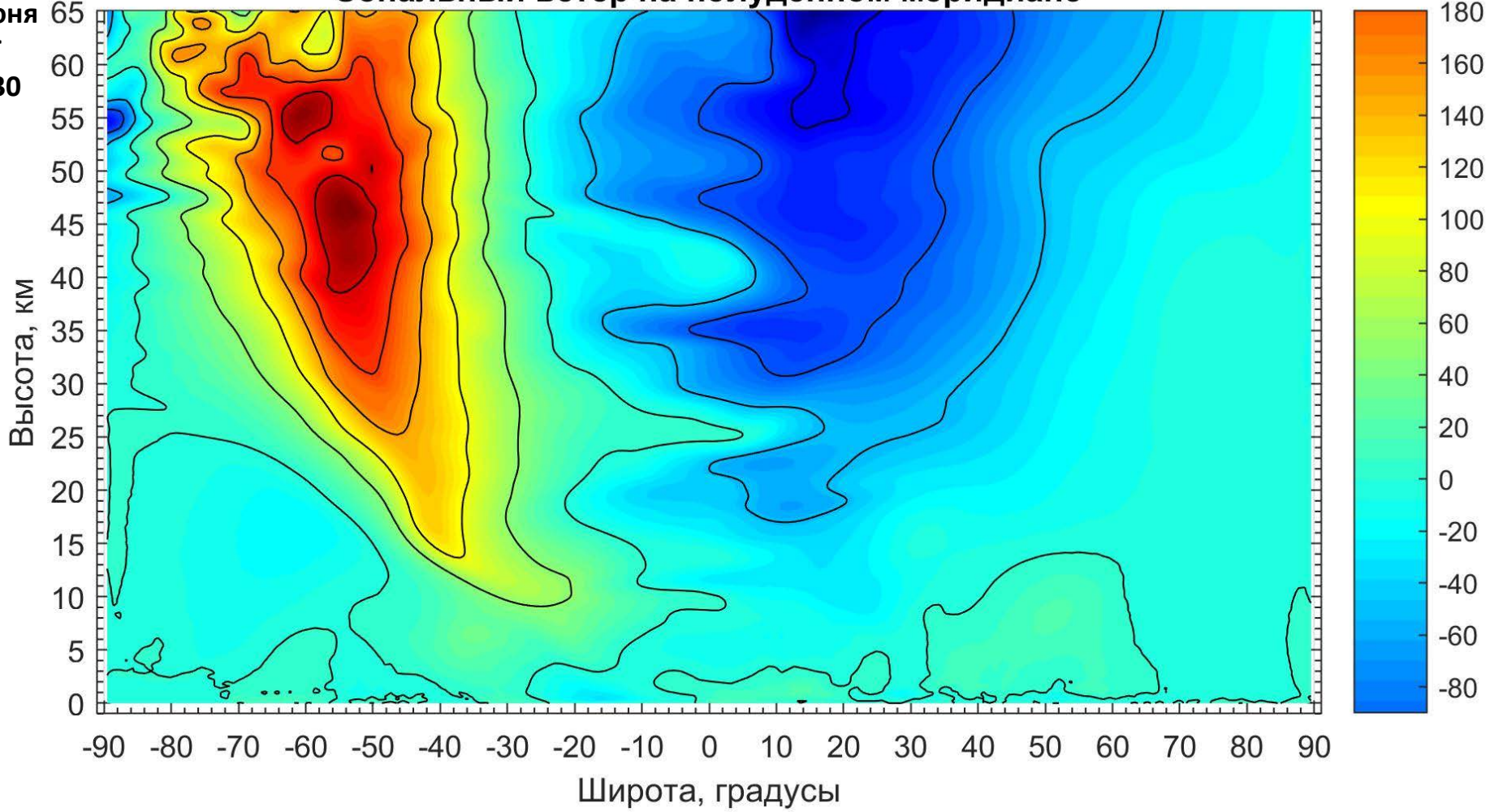
### Горизонтальный ветер на высоте 60 км через 2371 ч. 30 мин.





16  
июня  
UT  
7:30

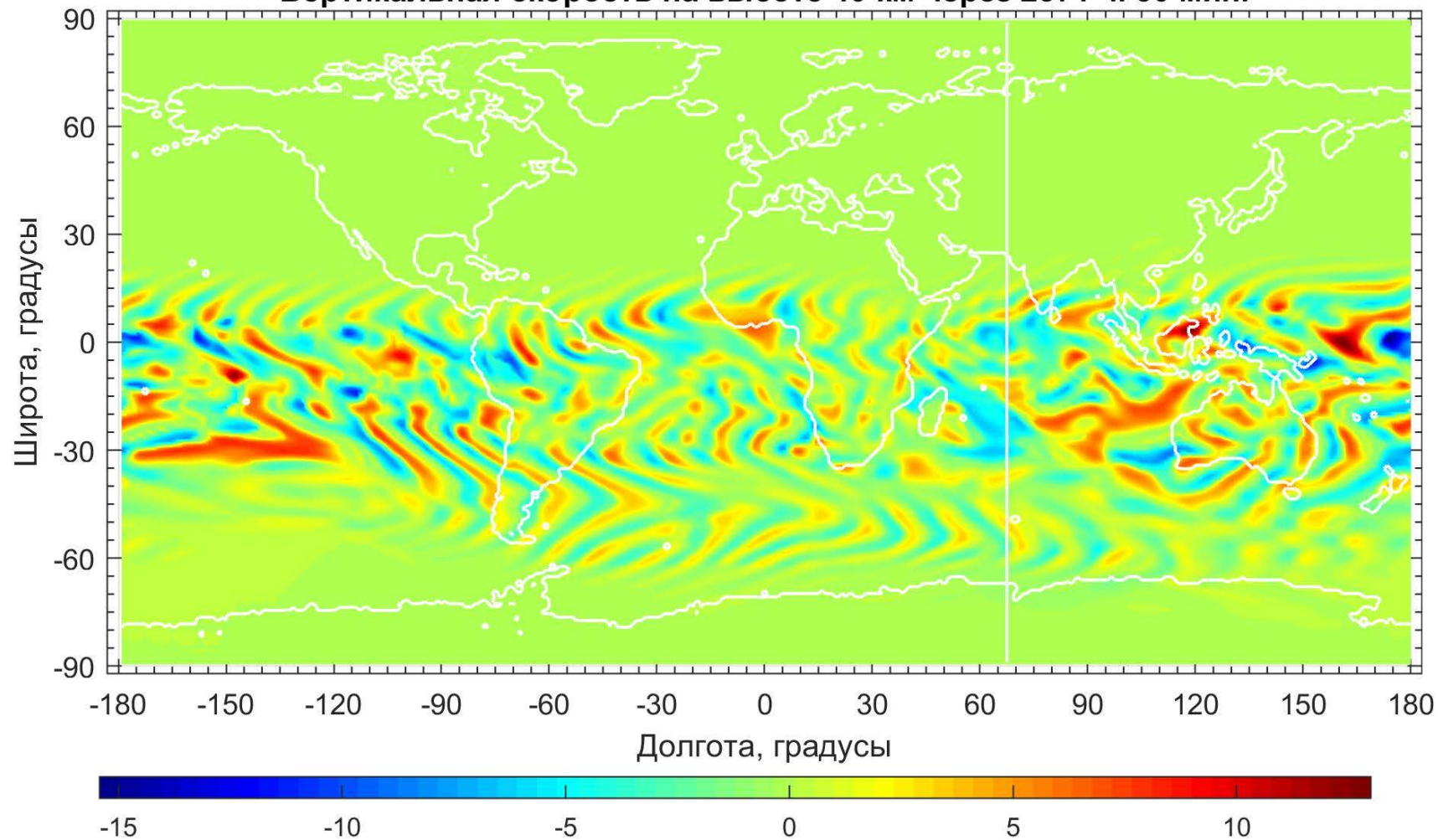
### Зональный ветер на полуденном меридиане





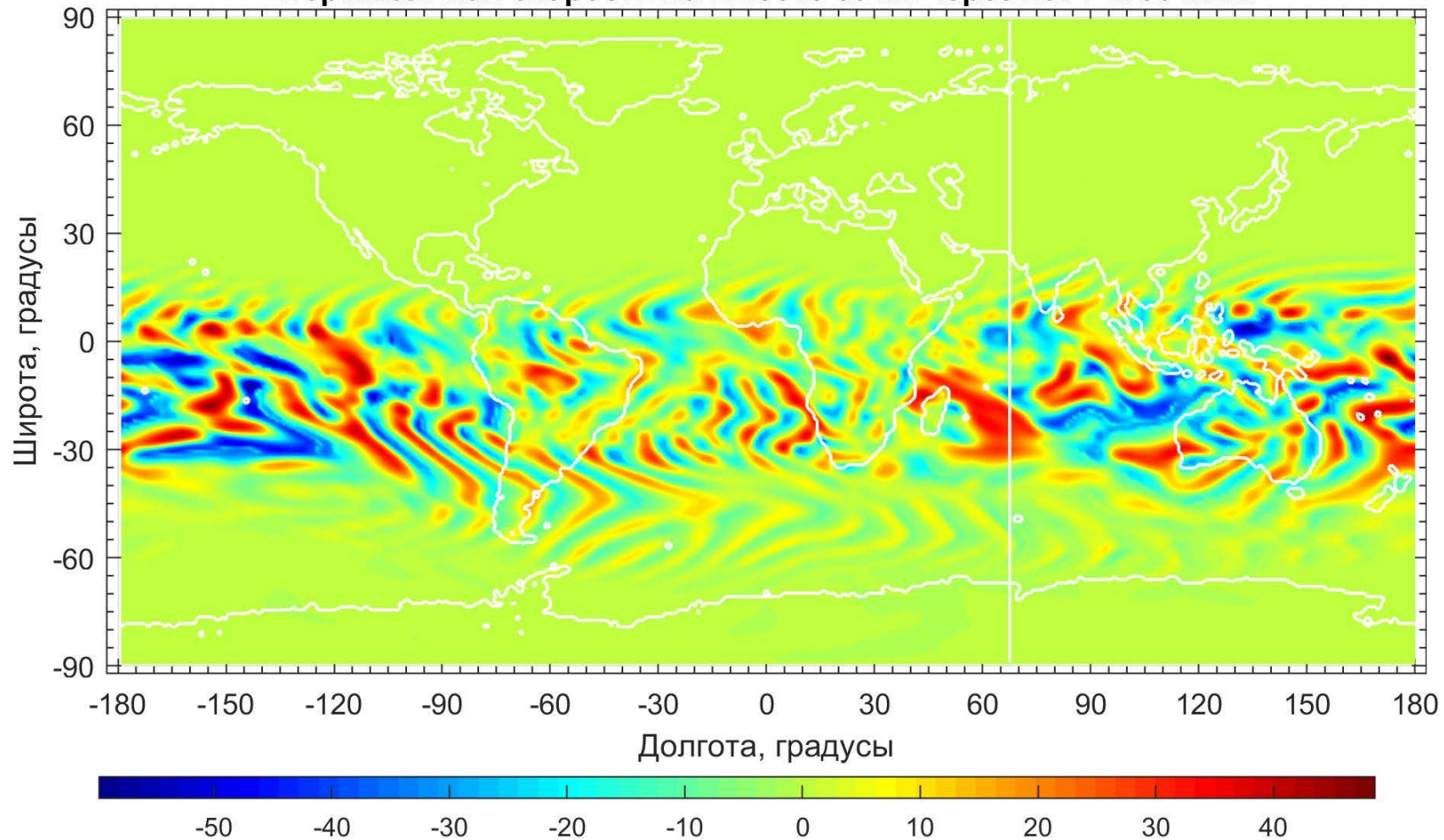
16  
июня  
UT 7:30

### Вертикальная скорость на высоте 40 км через 2371 ч. 30 мин.



16  
июня  
UT 7:30

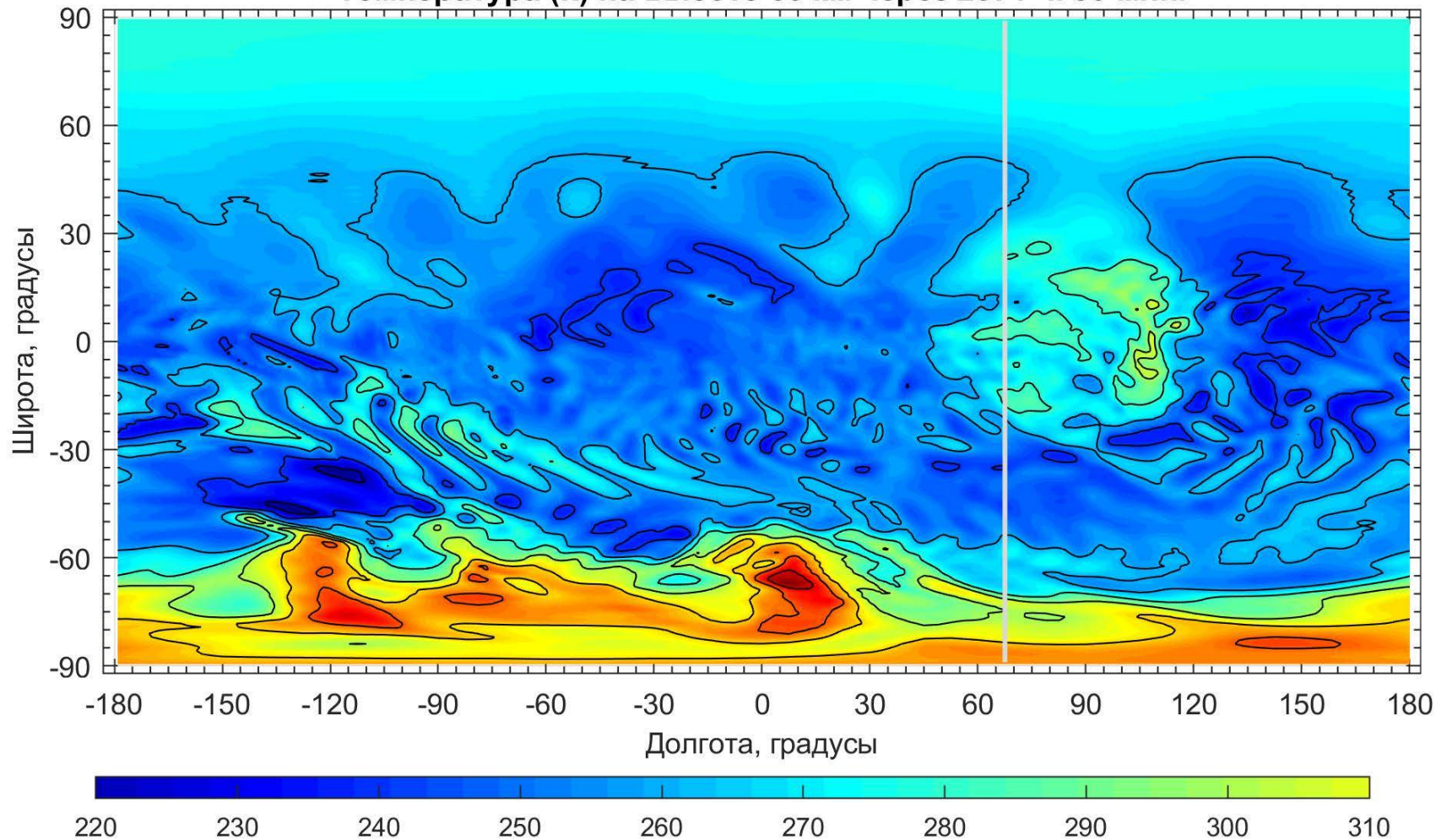
### Вертикальная скорость на высоте 60 км через 2371 ч. 30 мин.





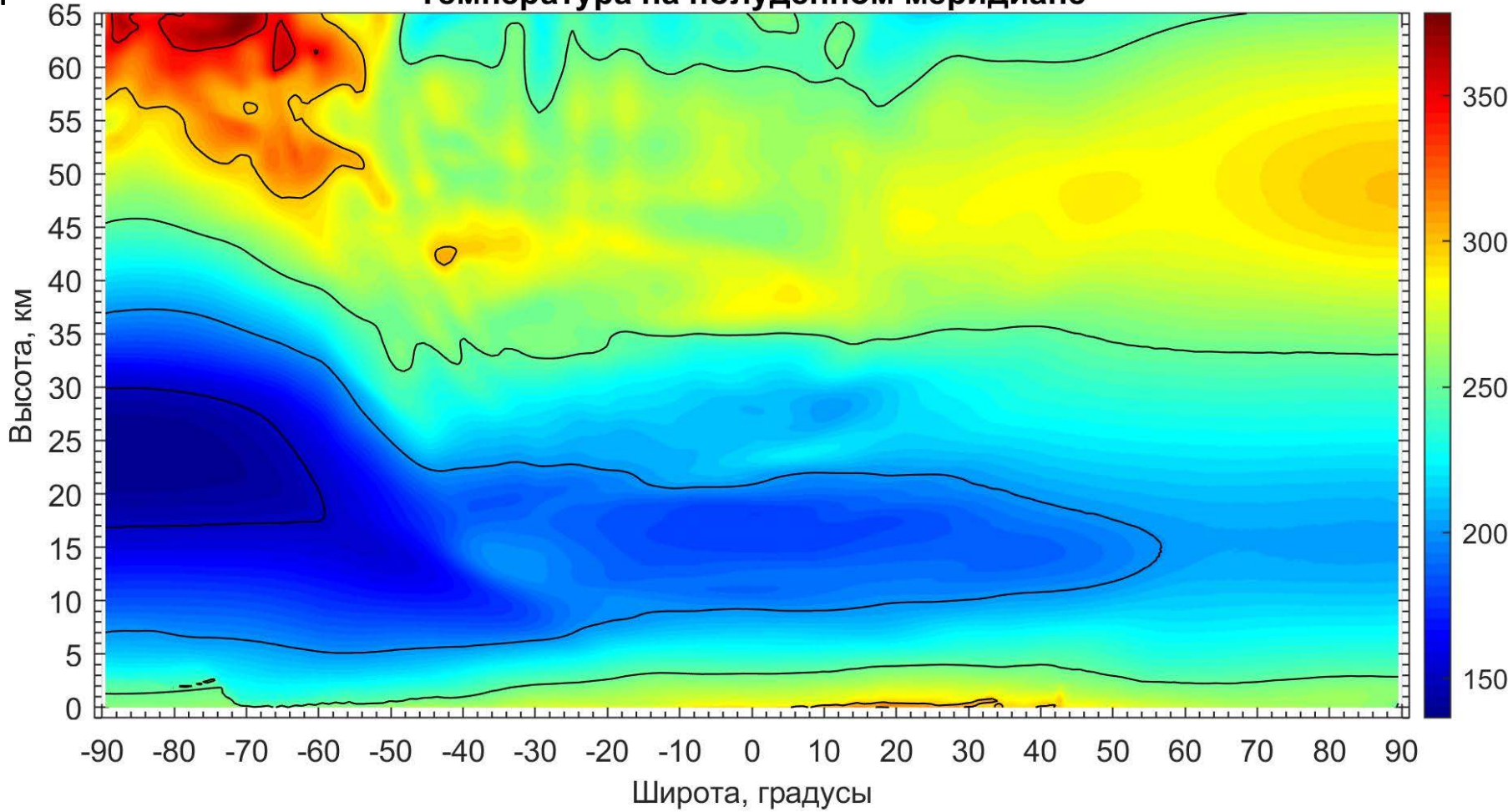
16  
июня  
УТ 7:30

### Температура (K) на высоте 60 км через 2371 ч. 30 мин.



16  
июня  
UT  
7:30

### Температура на полуденном меридиане





## Выводы

Одним из результатов является наличие над океанами приземных ячеек меридионально-вертикальной циркуляции. В летнем полушарии получились три ячейки: Приполюсная, Ферреля и Хедли, верхние границы которых лежат на разных высотах. В зимнем 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.

Также важным результатом моделирования является наличие опоясывающей Землю области, расположенной в январе на широтах от  $-15$  до  $60$  градусов, а в июле  $-60$  до  $15$  градусов, в которой чередуются изогнутые полосы и пятна, в которых вертикальная компонента ветра достигает значений, намного больших, чем вне этой области. Эти полосы и пятна неподвижны, но направление вертикальной компоненты ветра в них меняется с периодами от  $15$  до  $45$  минут. Величина вертикальной компоненты ветра в этих пятнах и полосах увеличивается с высотой от значений  $0.3-0.5$  м/с на высоте  $10$  км до значений  $38-40$  м/с на высоте  $60$  км. Анализ поля скорости показал, что указанные неоднородности в распределении вертикальной компоненты ветра обусловлены системой горных подветренных волн, которые возникают при обтекании горных систем потоками в нижней тропосфере. На распространение этих волн вверх от поверхности сильно влияет вертикальный градиент горизонтальной компоненты ветра.



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 Зимнего 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.

## Литература:

- **И.В. Мингалев, Н.М. Астафьева, К.Г. Орлов, В.М. Чечеткин, В.С. Мингалев, О.В. Мингалев. Численное моделирование формирования циклонических вихревых течений в области внутритропической зоны конвергенции и их раннее обнаружение // Космические исследования. 2012. Т. 50, № 3. С. 242–257.**
- **Б.Н. Четверушкин, И.В. Мингалев, К.Г. Орлов, В.М. Чечеткин, В.С. Мингалев, О.В. Мингалев. Газодинамическая модель общей циркуляции нижней и средней атмосферы Земли // Математическое моделирование. 2017, т. 29, № 8, С. 59-73.**
- **Б.Н. Четверушкин, И.В. Мингалев, Е.А. Федотова, К.Г. Орлов, В.М. Чечеткин, В.С. Мингалев. Расчет собственного излучения атмосферы в модели общей циркуляции нижней и средней атмосферы Земли // Математическое моделирование, 2020, том 32, № 2, С. 77-100.**
- **Б.Н. Четверушкин, И.В. Мингалев, Чечеткин В.М., Орлов К.Г., Федотова Е.А., Мингалев В.С. Блок расчета солнечного излучения атмосферы в модели общей циркуляции нижней и средней атмосферы Земли // Математическое моделирование, 2022, том 34, № 3, С. 43-70.**