

Системы гравитационных волн в средней и верхней атмосфере Земли в разные сезоны

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

Полярный геофизический институт

В докладе обсуждаются системы гравитационных волн, которые возникают в атмосфере при обтекании горных систем крупномасштабными зональными течениями, формирующимися над Тихим океаном в разные сезоны. Эти волны изучаются с помощью численного моделирования общей циркуляции атмосферы Земли в диапазоне высот от 0 до 80 км. Моделирование проводилось с использованием газодинамической модели с полноценным учетом радиационного нагрева-выхолаживания воздуха и пространственным разрешением около 50 км.

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.

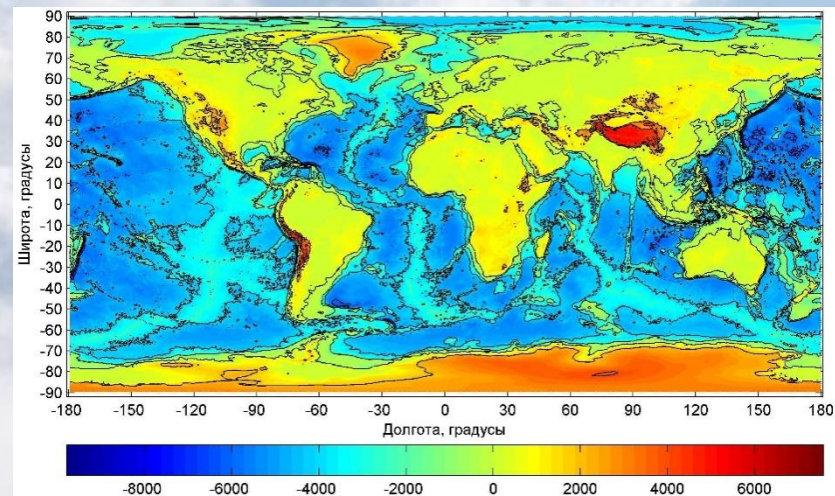
В модели учитывается несферичность земной поверхности и несферичность гравитационного поля Земли. Область моделирования простирается от поверхности Земли до сферы, центр которой совпадает с центром Земли.

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.

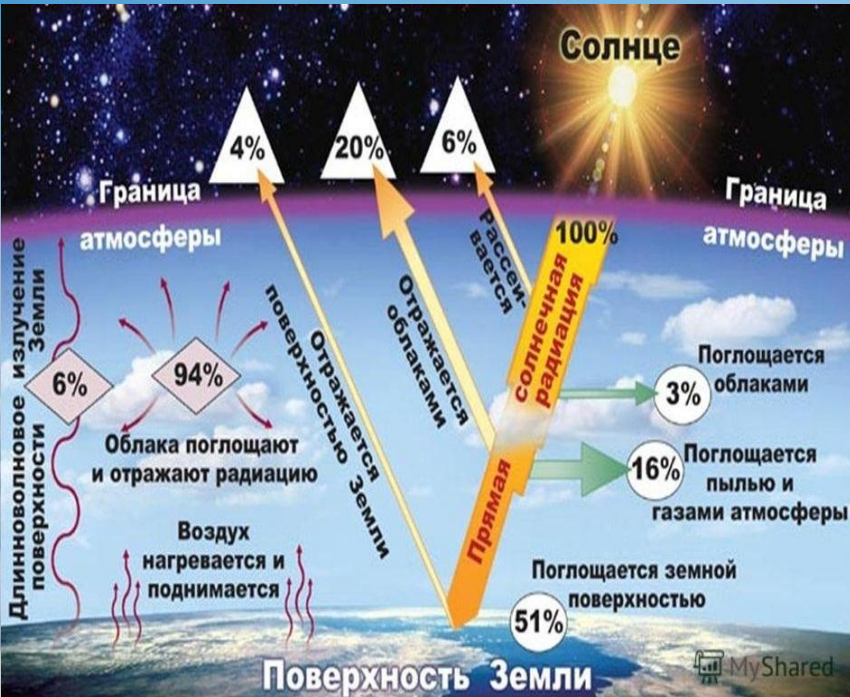
Mingalev I.V., Orlov K.G., Mingalev V.S. Numerical Modeling of the Influence of the Relief of a Planet on the Global Circulation of the Earth's Stratosphere and Mesosphere // *Atmospheric and Climate Sciences*, 2017, том 7, № 04, с. 496-510

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.

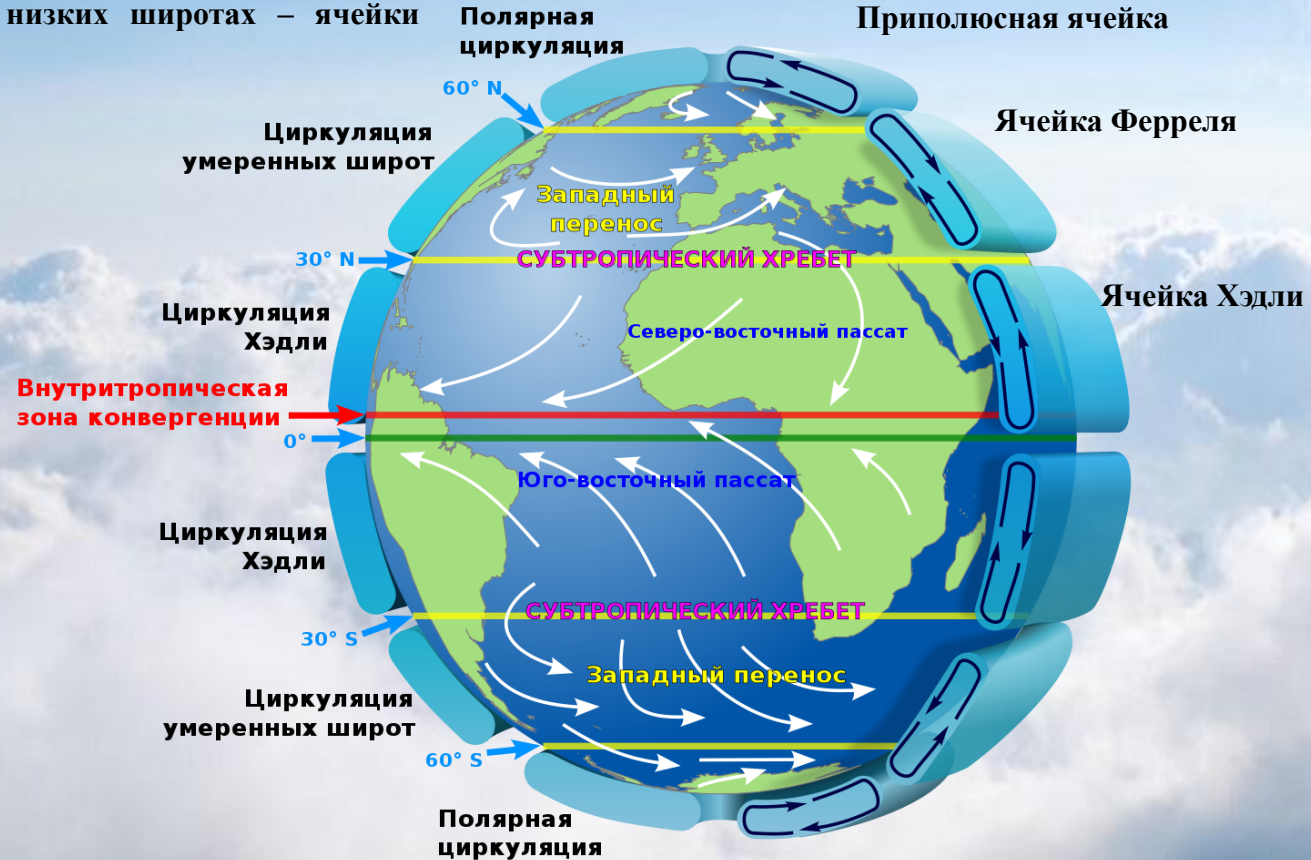
Алгоритм построения этих параметризаций учитывает изменение газового состава атмосферы с высотой, а также учитывает нарушение локально термодинамического равновесия в верхней атмосфере в полосах поглощения озона с длинами волн около 9,6 мкм и полосах поглощения углекислого газа с длинами волн около 15,6 мкм, а также 4,2 и 2,7 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

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 расположены 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

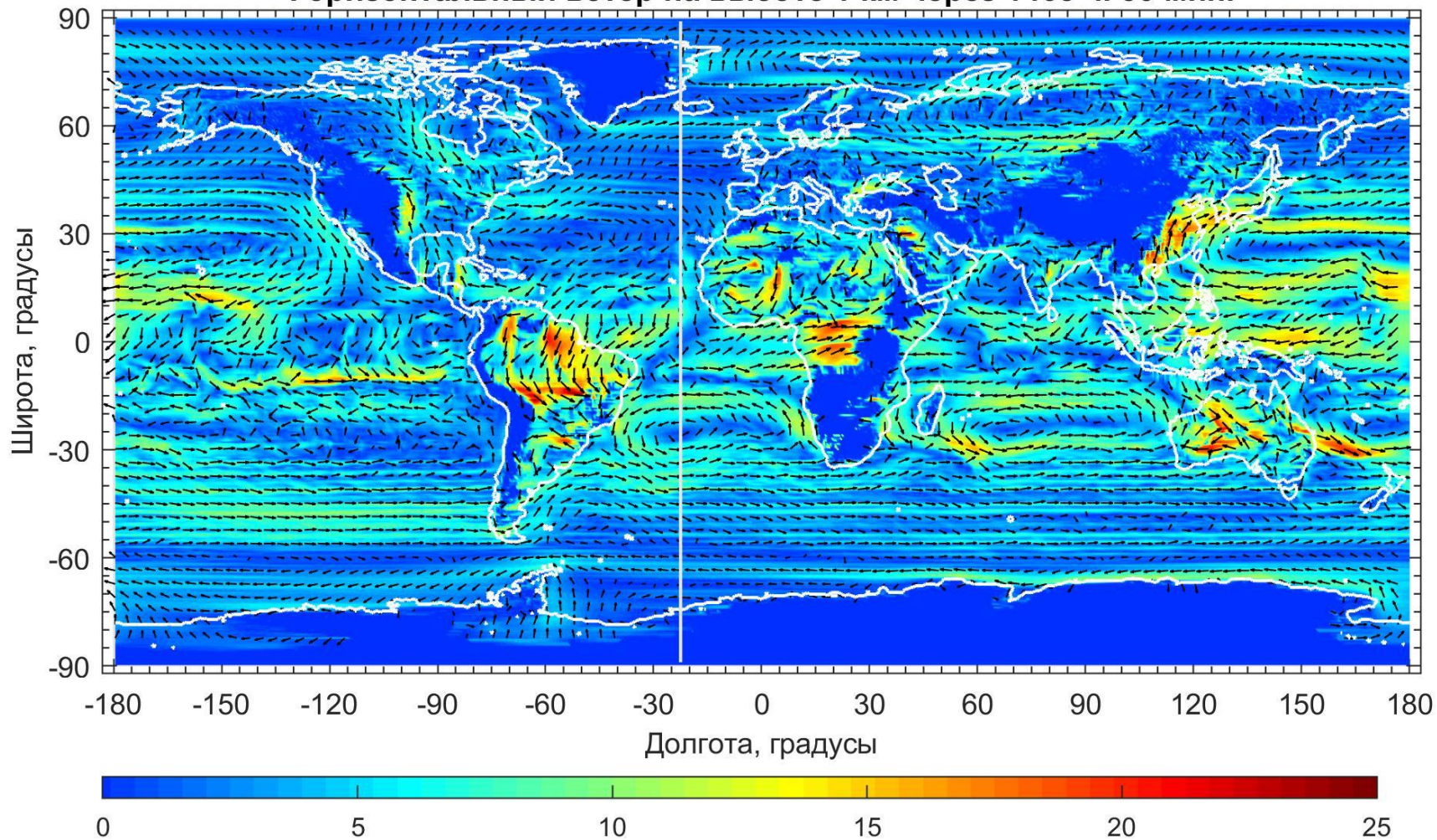
Начальные условия для моделирования были следующие. Скорость ветра во всей области моделирования была равна нулю, а распределения плотности и температуры воздуха были заданы по эмпирической модели NRLMSISE-00 [19] для 16 января UT 12:00 и спокойных геофизических условий.

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.

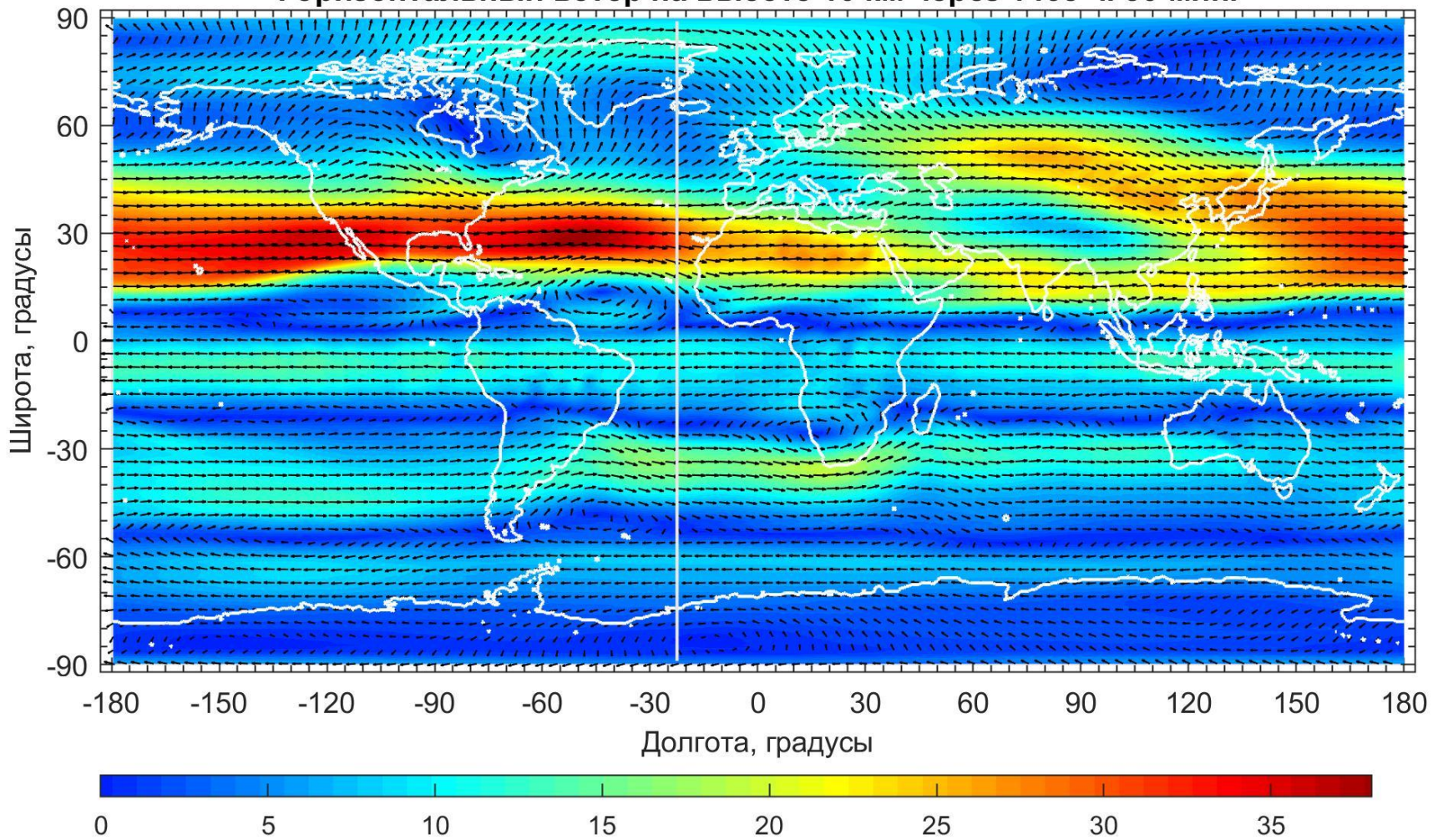


Видно, что на высоте 1 км над уровнем моря в южном полушарии на широтах от -85° до примерно -62° зональная компонента ветра направлена с востока на запад, а на широтах от -58° до -30° зональная компонента ветра направлена с запада на восток, и что на широтах от -62° до -58° существует течение со сдвигом 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° и долготой -23° и имеет диаметр примерно 2600-2700 км. Второй из них расположен над Индийским океаном с центром в точке с широтой примерно -25° и долготой 73° и имеет диаметр примерно 2500-2600 км. Третий из этих вихрей расположен над Тихим океаном с центром в точке с широтой примерно -23° и долготой 170° и имеет диаметр примерно 2100-2200 км.

Видно, что в северном полушарии над Тихим океаном на широтах от 28° до 55° 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° до 20° 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° до 50° 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° и долготой 70° и диаметром примерно 1500 км.

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

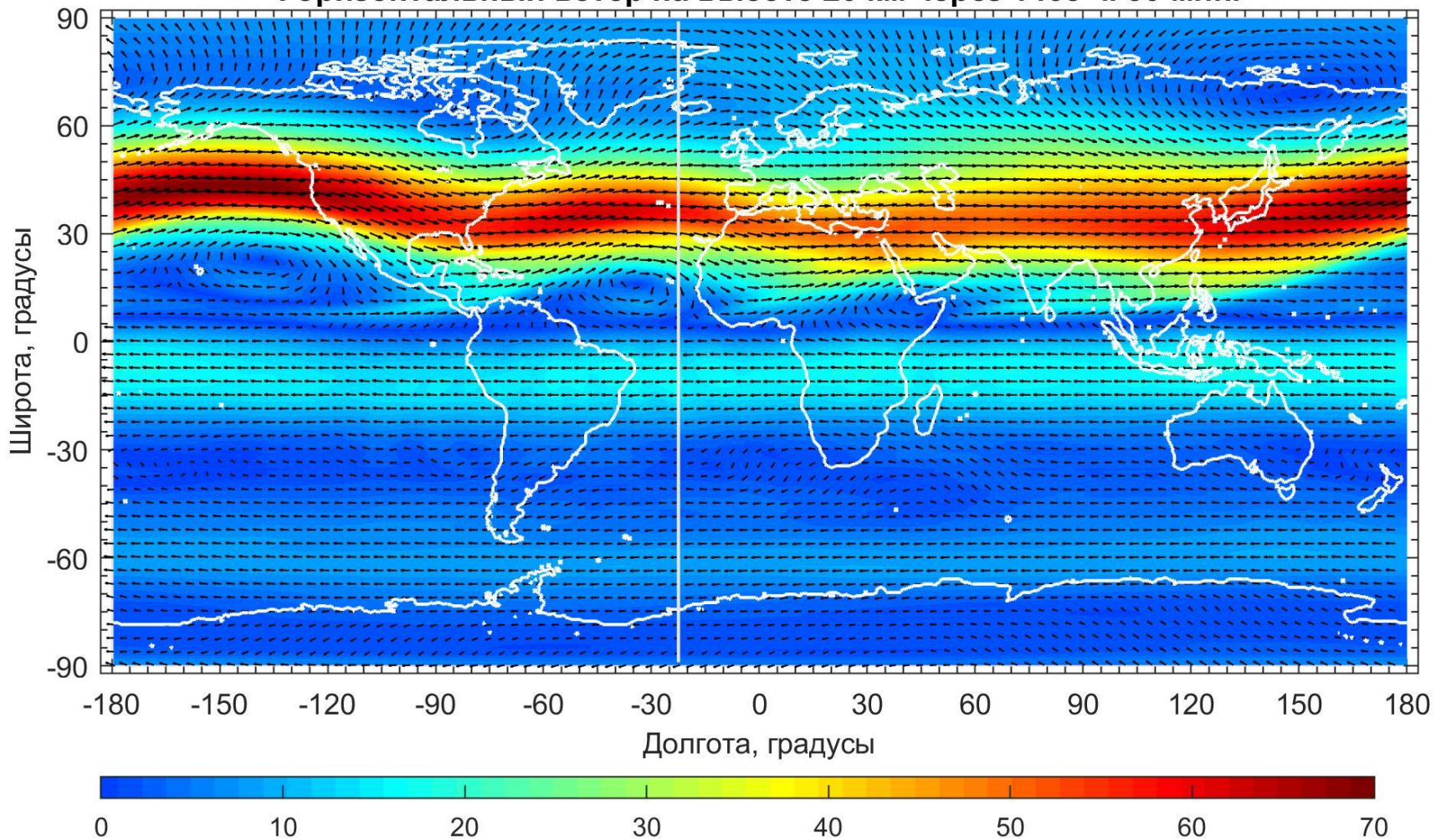
16
января
UT 13:30



Видно, что на высоте 10 км над уровнем моря в южном полушарии на широтах от -85° до примерно -55° зональная компонента ветра направлена с востока на запад, а на широтах от -50° до примерно -30° 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° и долготой примерно -45° . Видно, что на широтах от -20° до примерно 0° 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° и долготой примерно 20° . Севернее экватора расположено сдвиговое течение, прерываемое крупномасштабным антициклоническим вихрем с центром в точке с широтой примерно 12° и долготой примерно -42° . Севернее сдвигового течения над Тихим океаном, Северной Америкой и Атлантическим океаном на широтах от 10° до примерно 50° 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.

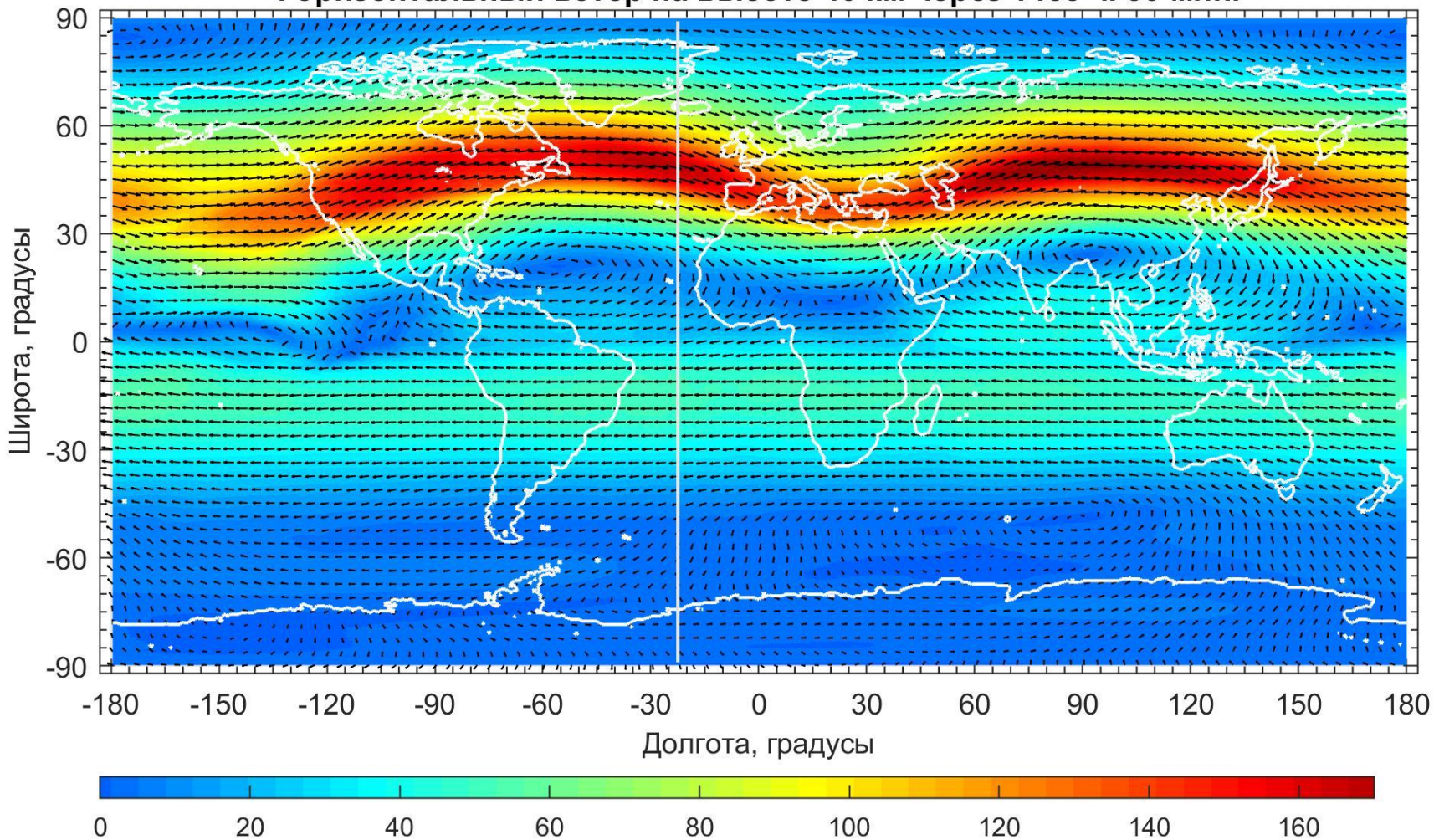
16
января
UT 13:30



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 50 до 100 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.

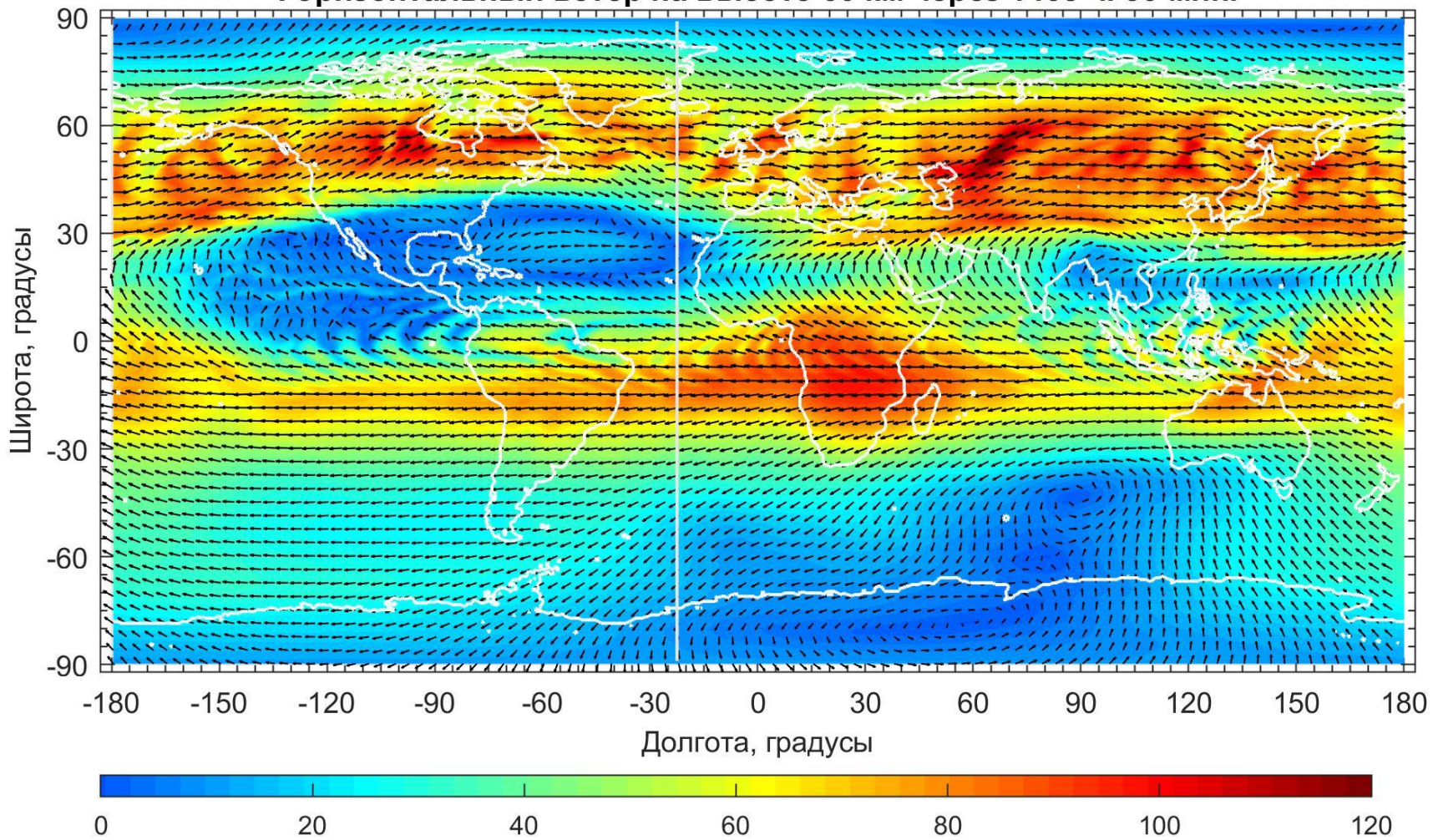
16
января
UT 13:30



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° до -5° абсолютная величина скорости ветра достигает 50-55 м/с. Севернее экватора на широтах примерно от 0° до 25° расположена переходная зона, в которой имеется два крупных антициклонических вихря, центры которых расположены в точках с долготами примерно -60° и 95° , а третий вихрь меньшего размера с центром на долготе -130° . Севернее переходной зоны на широтах от 20° до 70° 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.

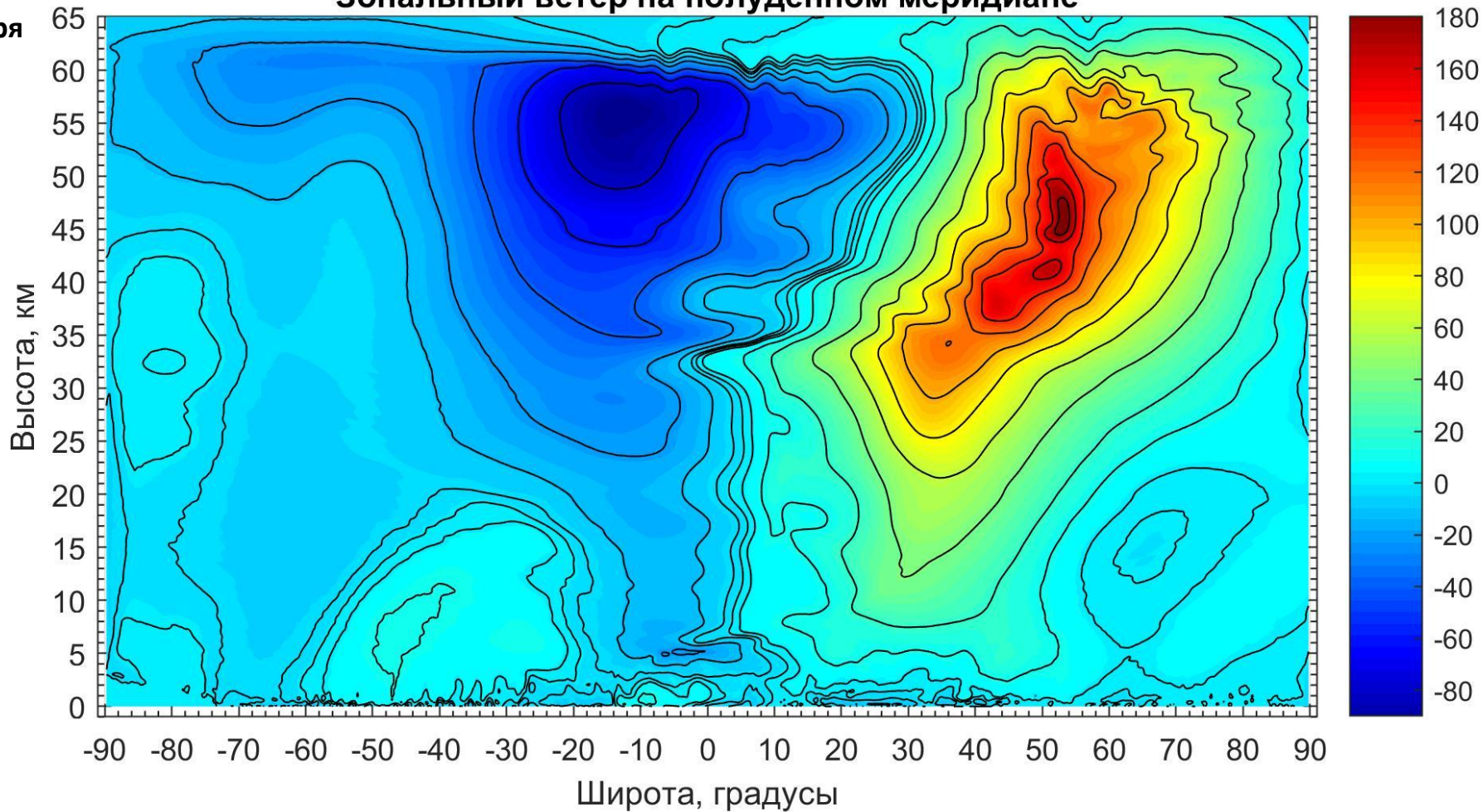
16
января
UT 13:30



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° до 0° скорость ветра достигает значений 75-90 м/с, а в расположенном в северном полушарии на широтах от 20° до 75° 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

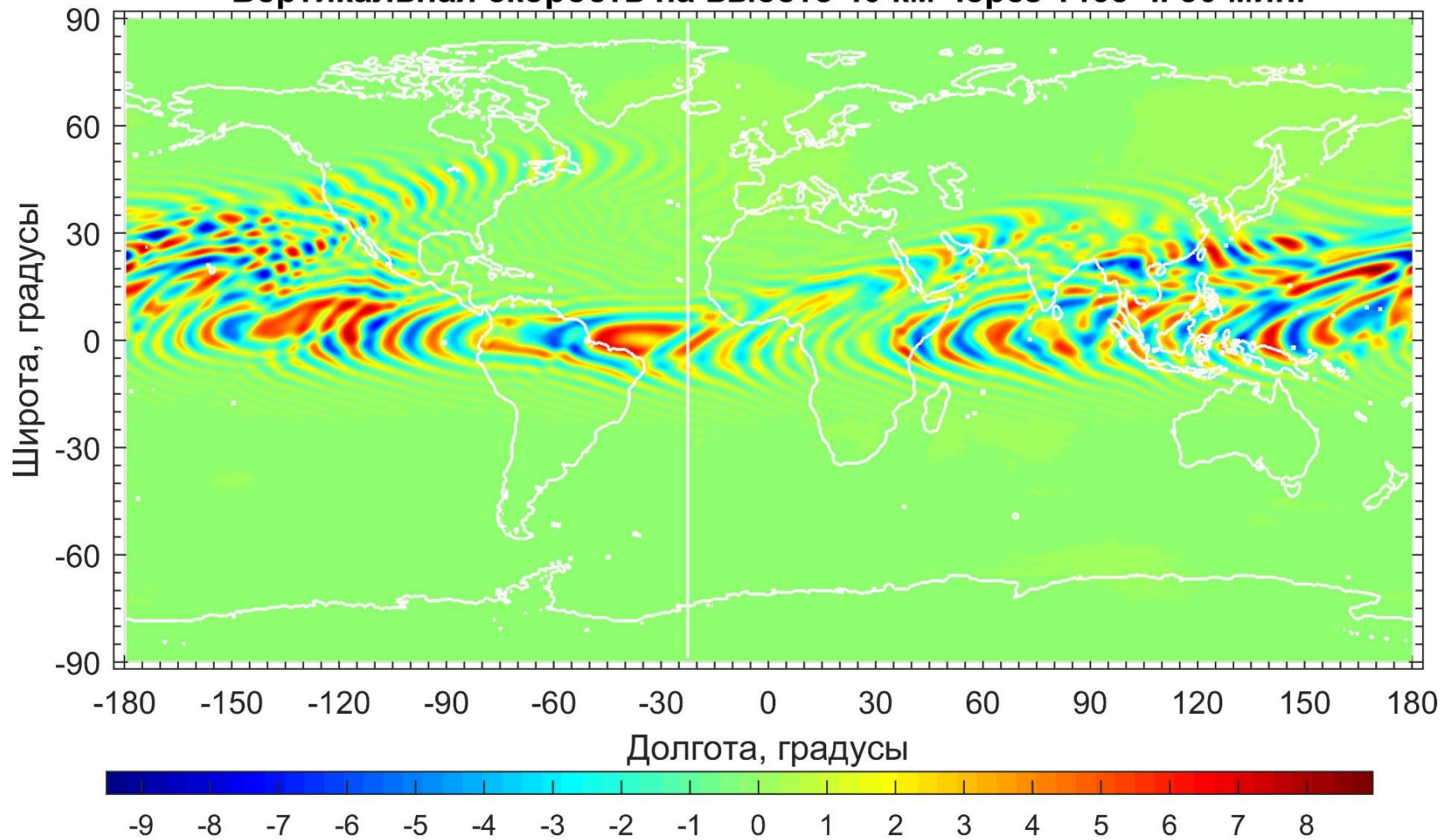
Зональный ветер на полуденном меридиане



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° до 25° 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° до 0° 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° до 60° 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.

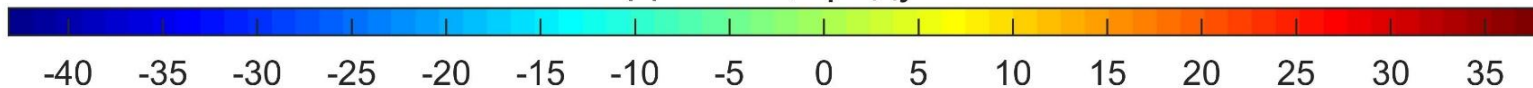
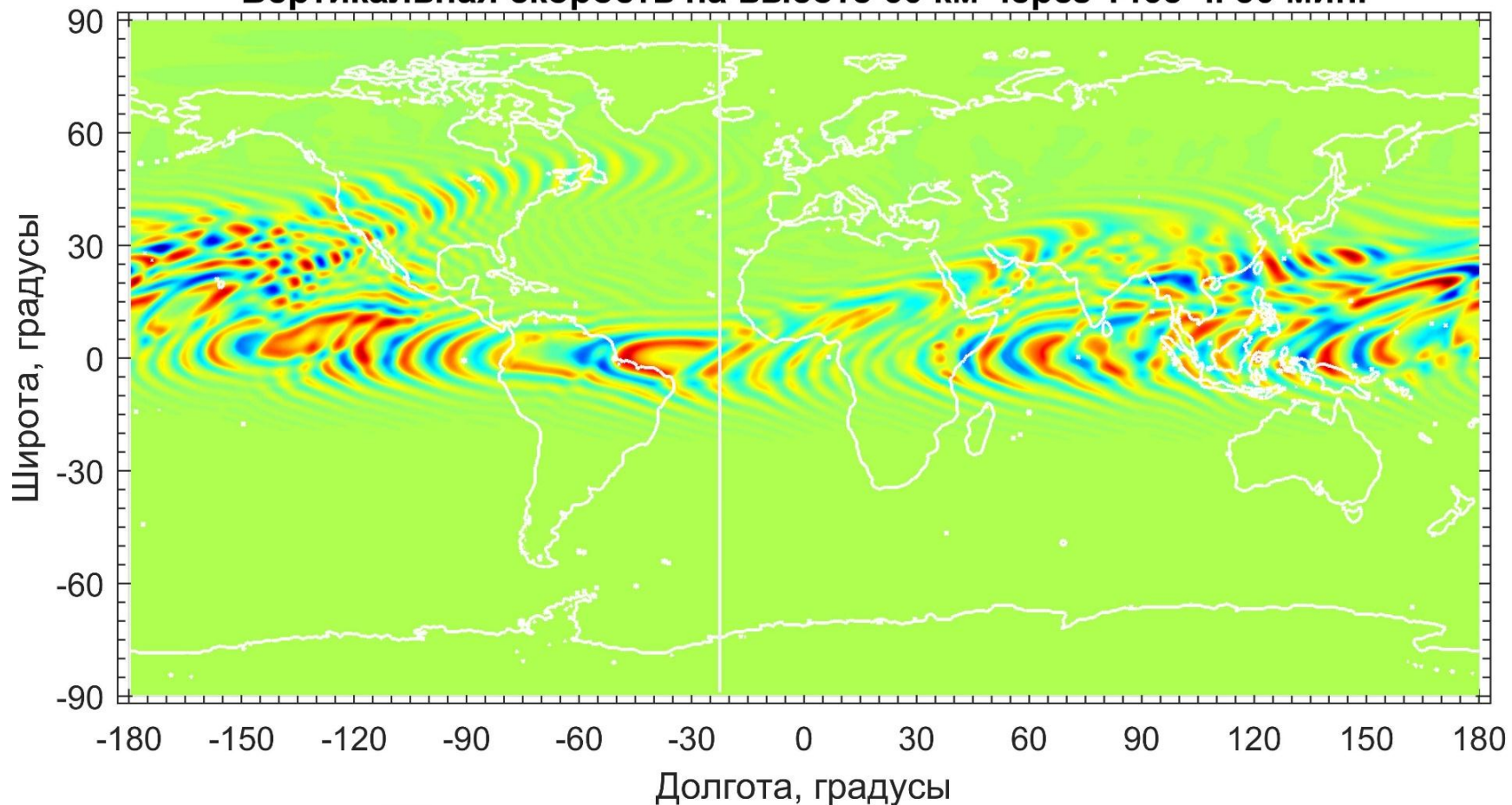
Вертикальная скорость на высоте 40 км через 1465 ч. 30 мин.

16
января
UT 13:30



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

16
января
UT 13:30

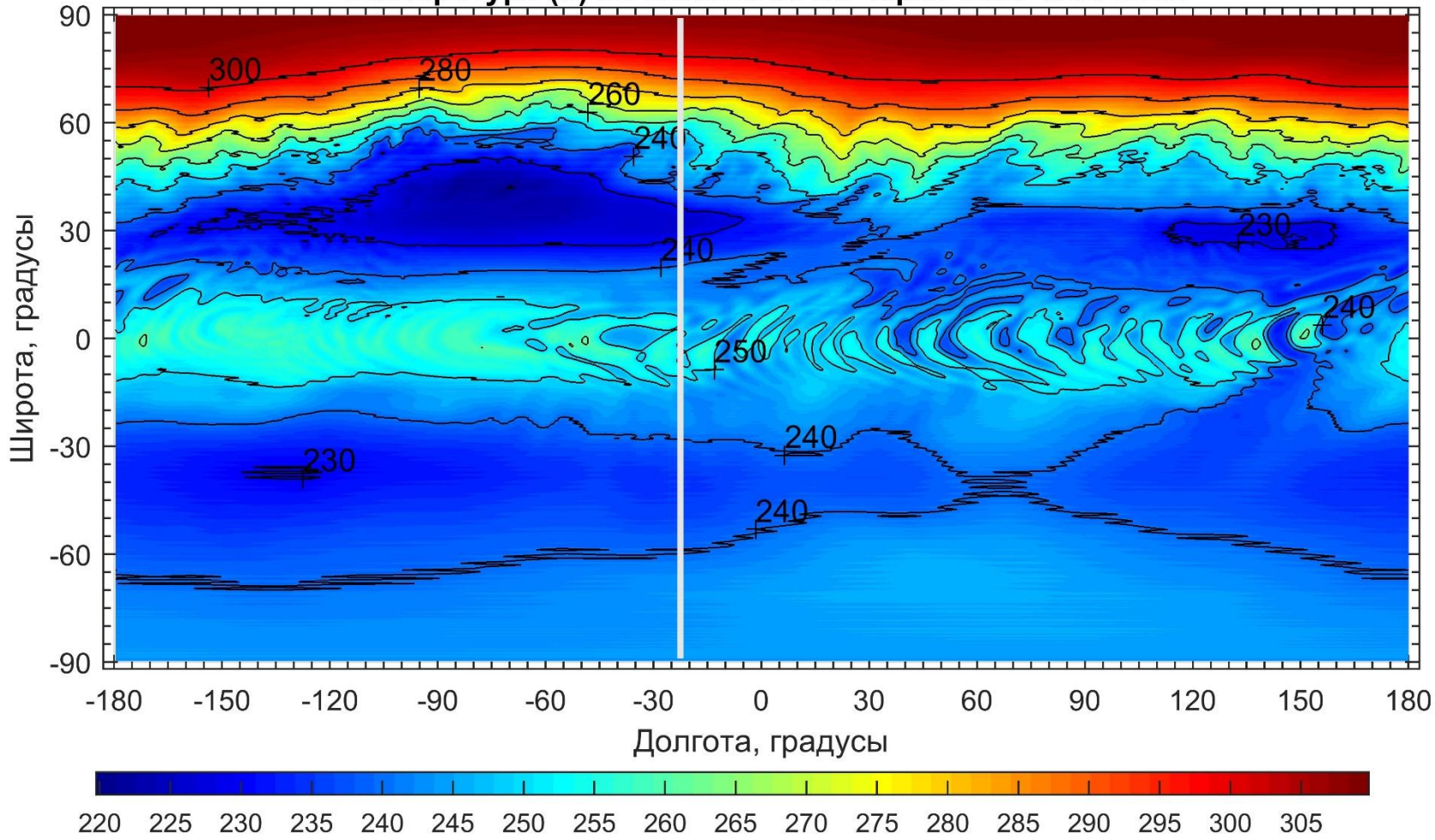


Видно, что на высоте 40 км над уровнем моря распределение вертикальной компоненты ветра имеет следующие особенности. На широтах от -15° до 60° имеется область, где чередуются изогнутые полосы и пятна, в которых вертикальная компонента ветра достигает значений от -9 до 9 м/с. Эта область опоясывает Землю 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.

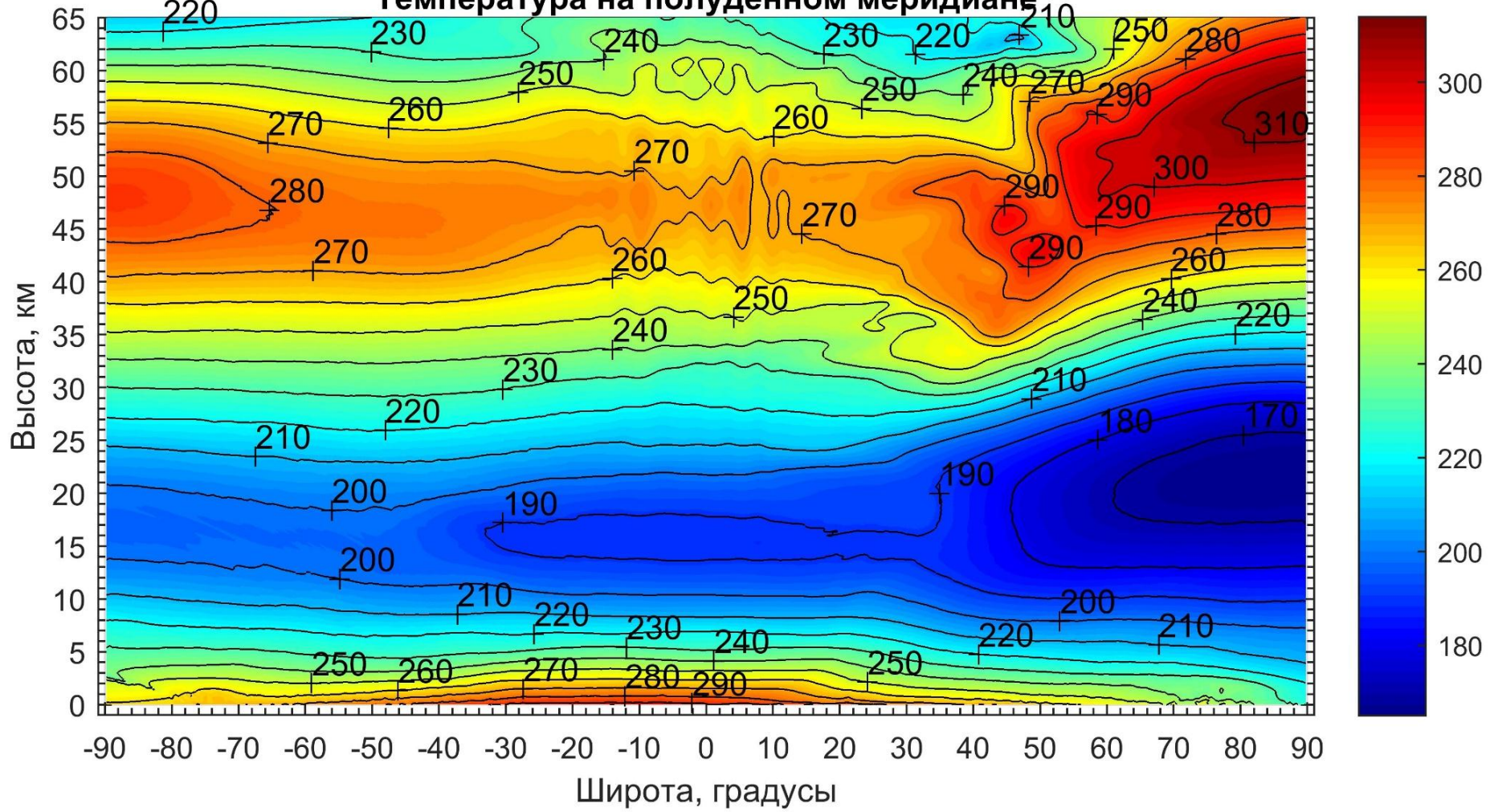
Также получилось, что на высотах 10, 20 и 30 км над уровнем моря распределение вертикальной компоненты ветра имеет те же особенности, что и на высоте 40 км, и отличается только тем, что в чередующихся изогнутых полосах и пятнах вертикальная компонента ветра достигает значений, абсолютная величина которых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

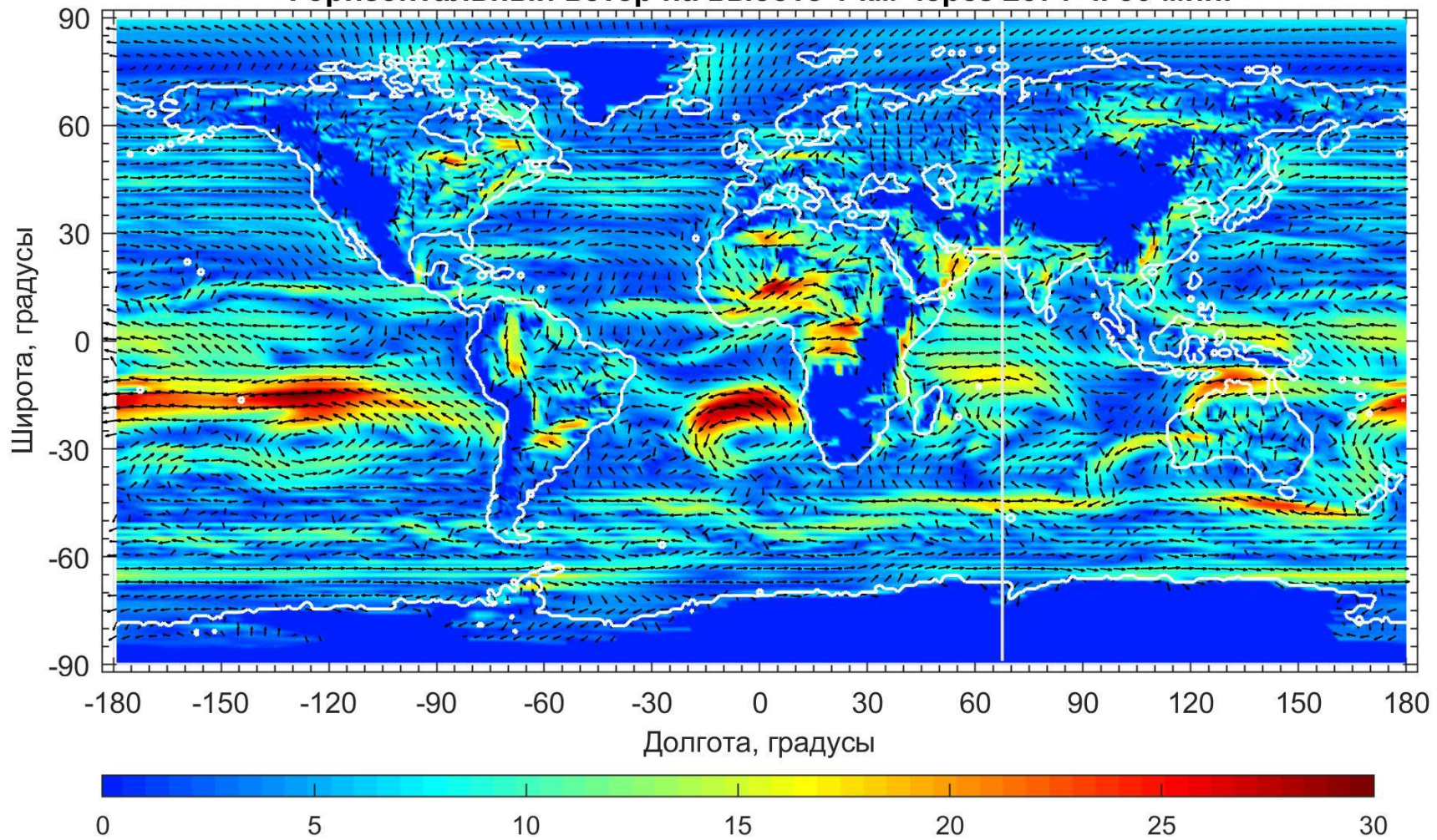
Видно, что высота тропопаузы в зимней полярной области в северном полушарии составляет 21-22 км, что выше, чем эта высота над экватором и в летнем южном полушарии, где она составляет 17-18 км. Такая особенность соответствует данным наблюдений. Также видно, что на высотах более 50 км в северном полушарии 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.**



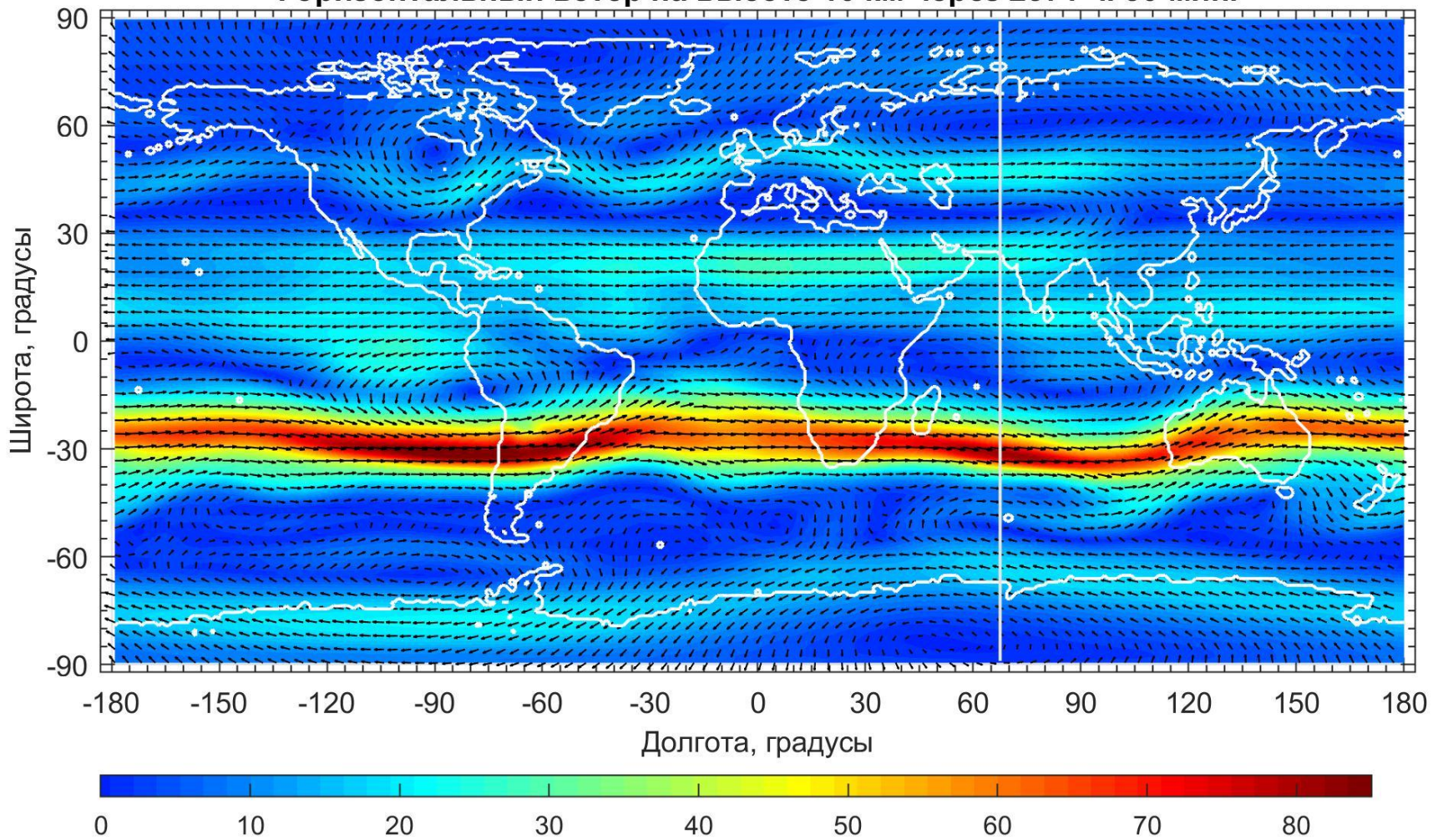
16
июня
УТ 7:30

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



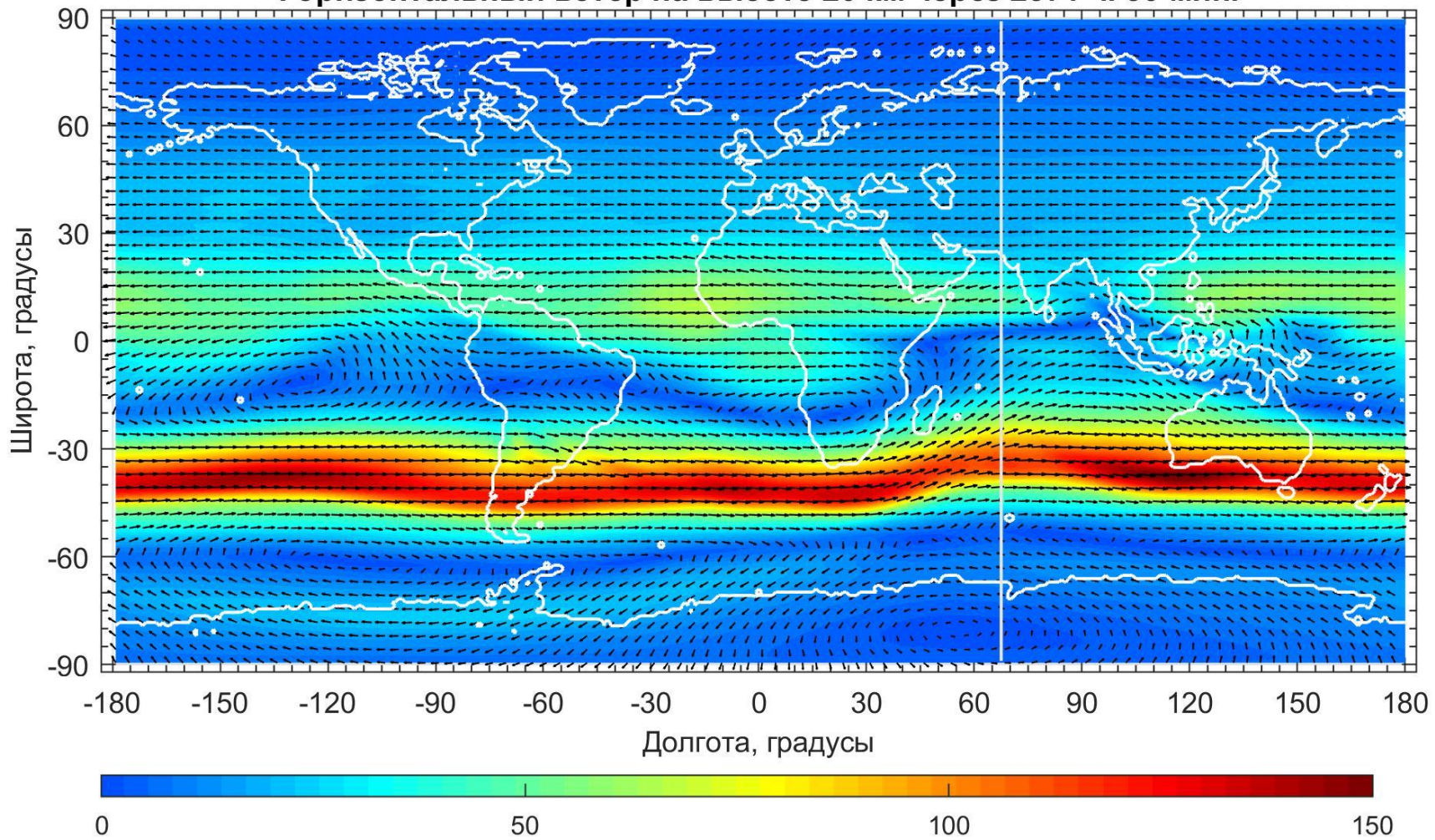
16
июня
UT 7:30

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



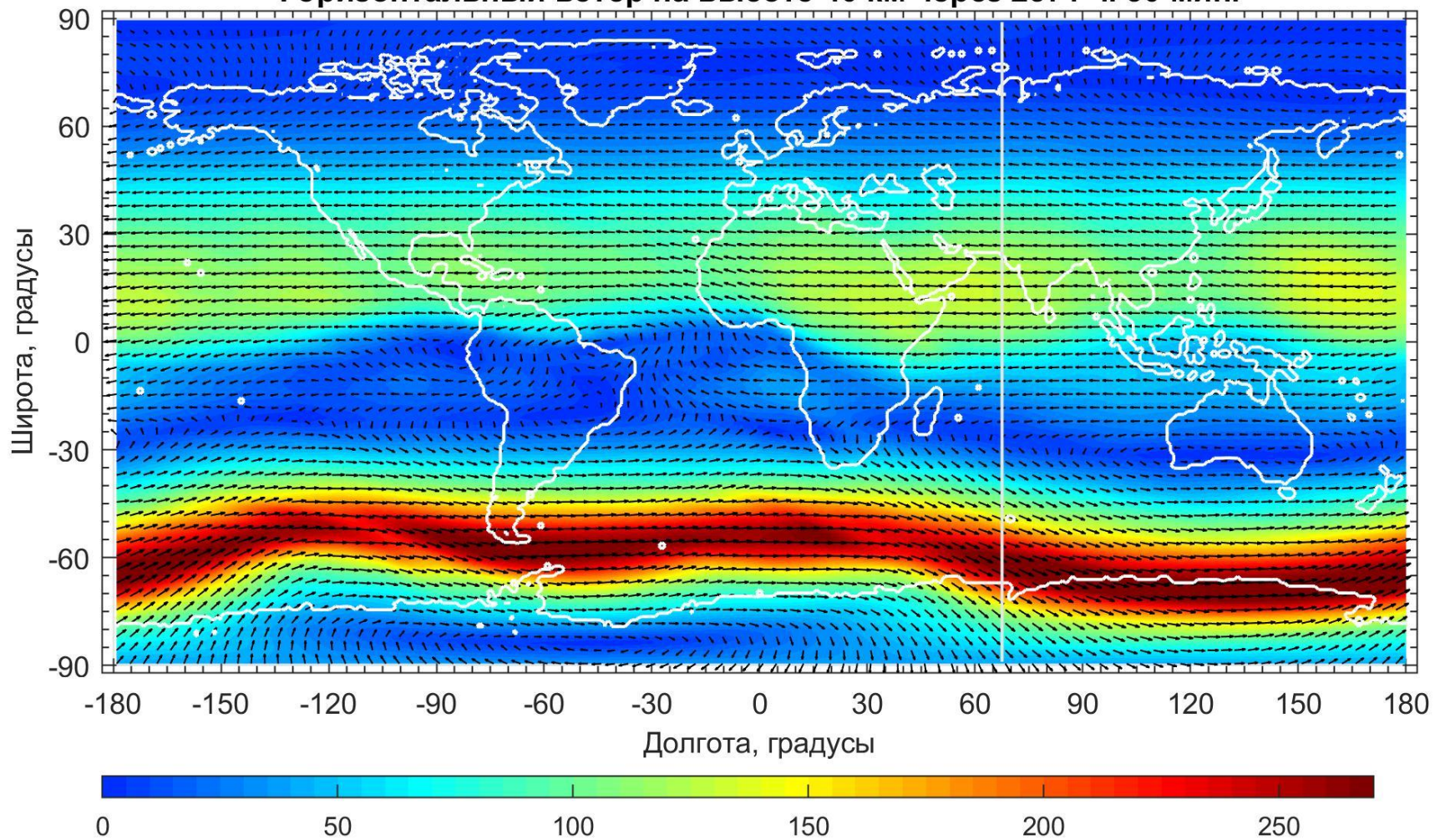
16
июня
UT 7:30

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



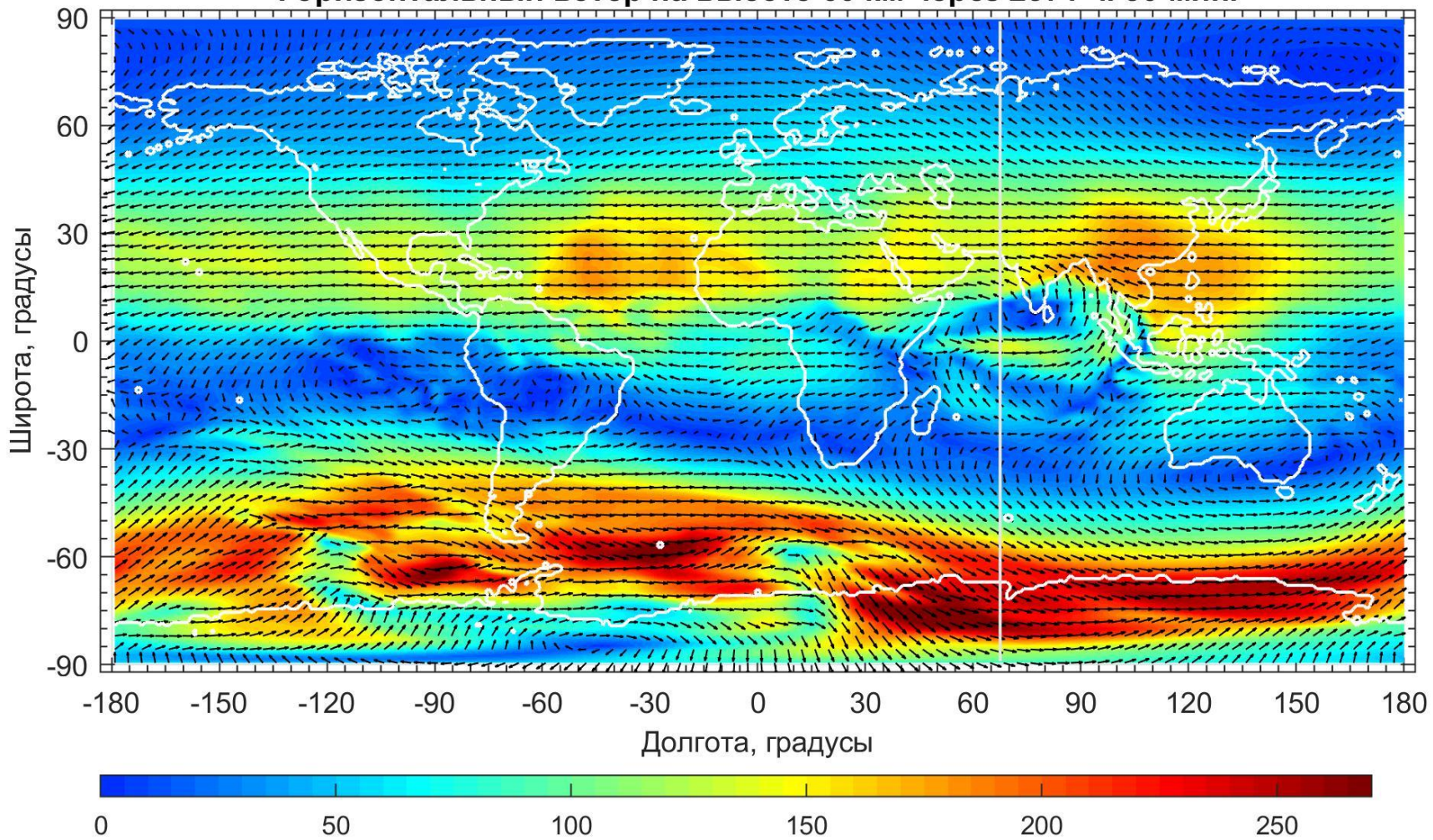
16
июня
UT 7:30

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



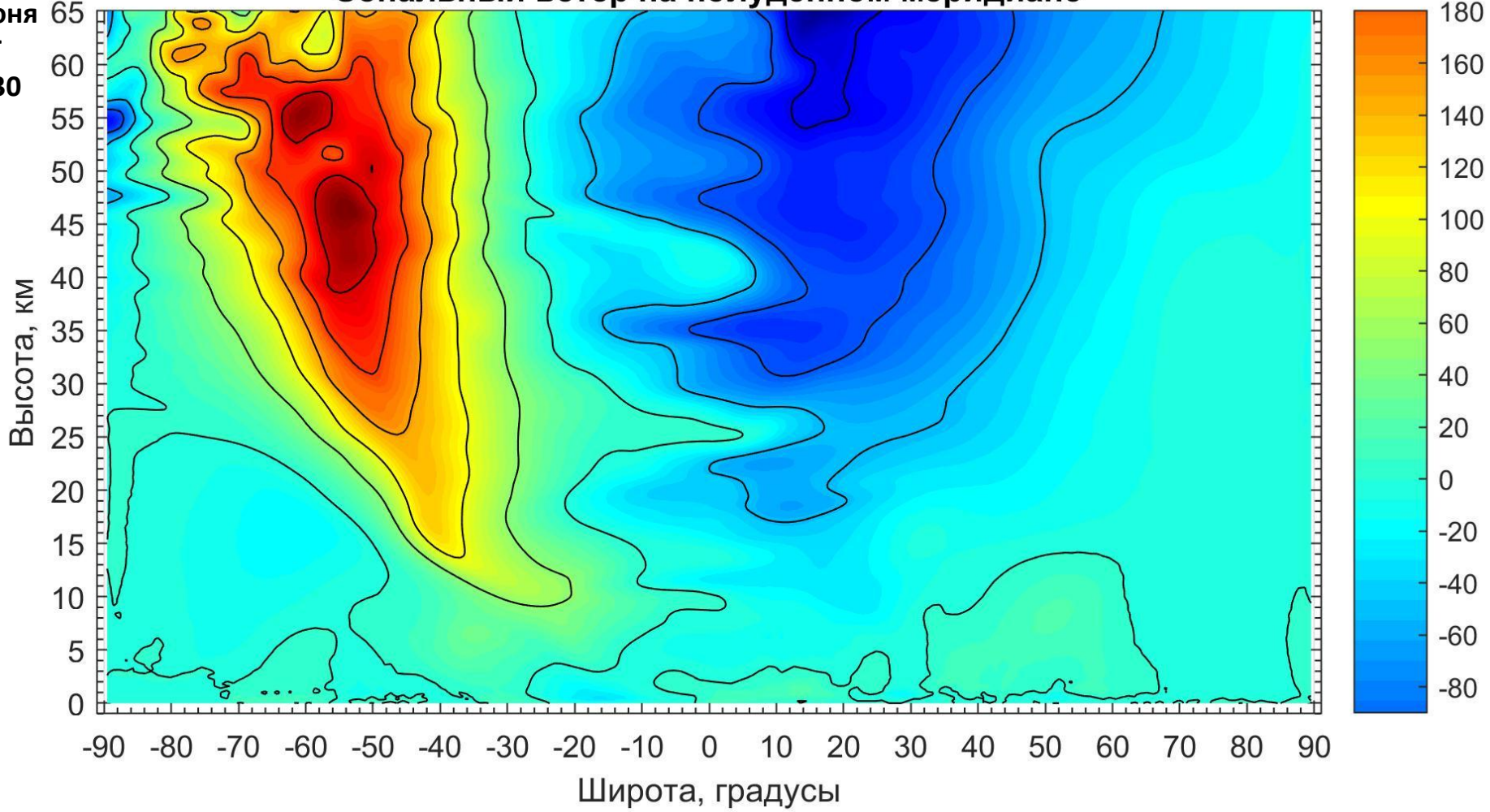
16
июня
УТ 7:30

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



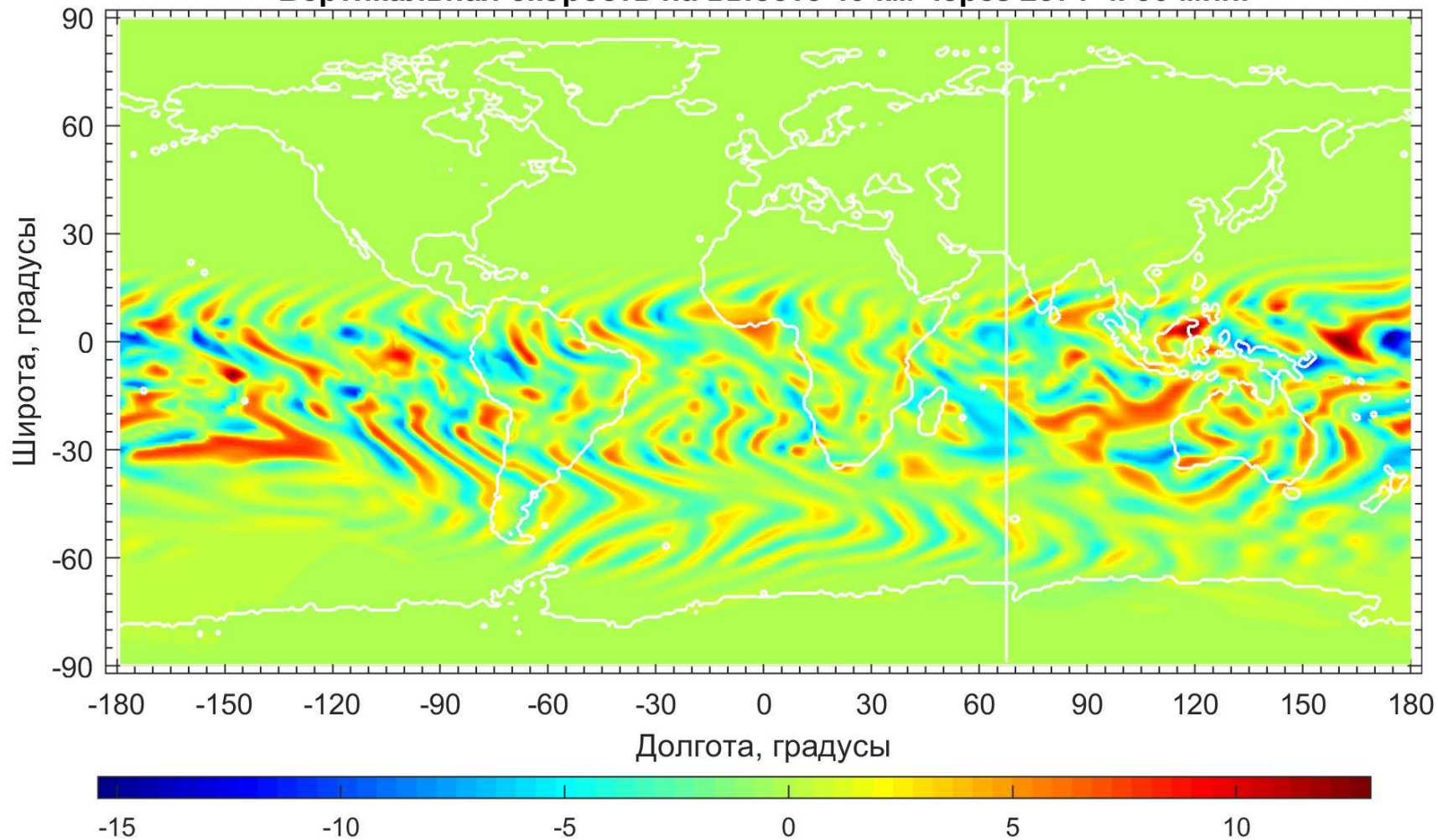
16
июня
UT
7:30

Зональный ветер на полуденном меридиане



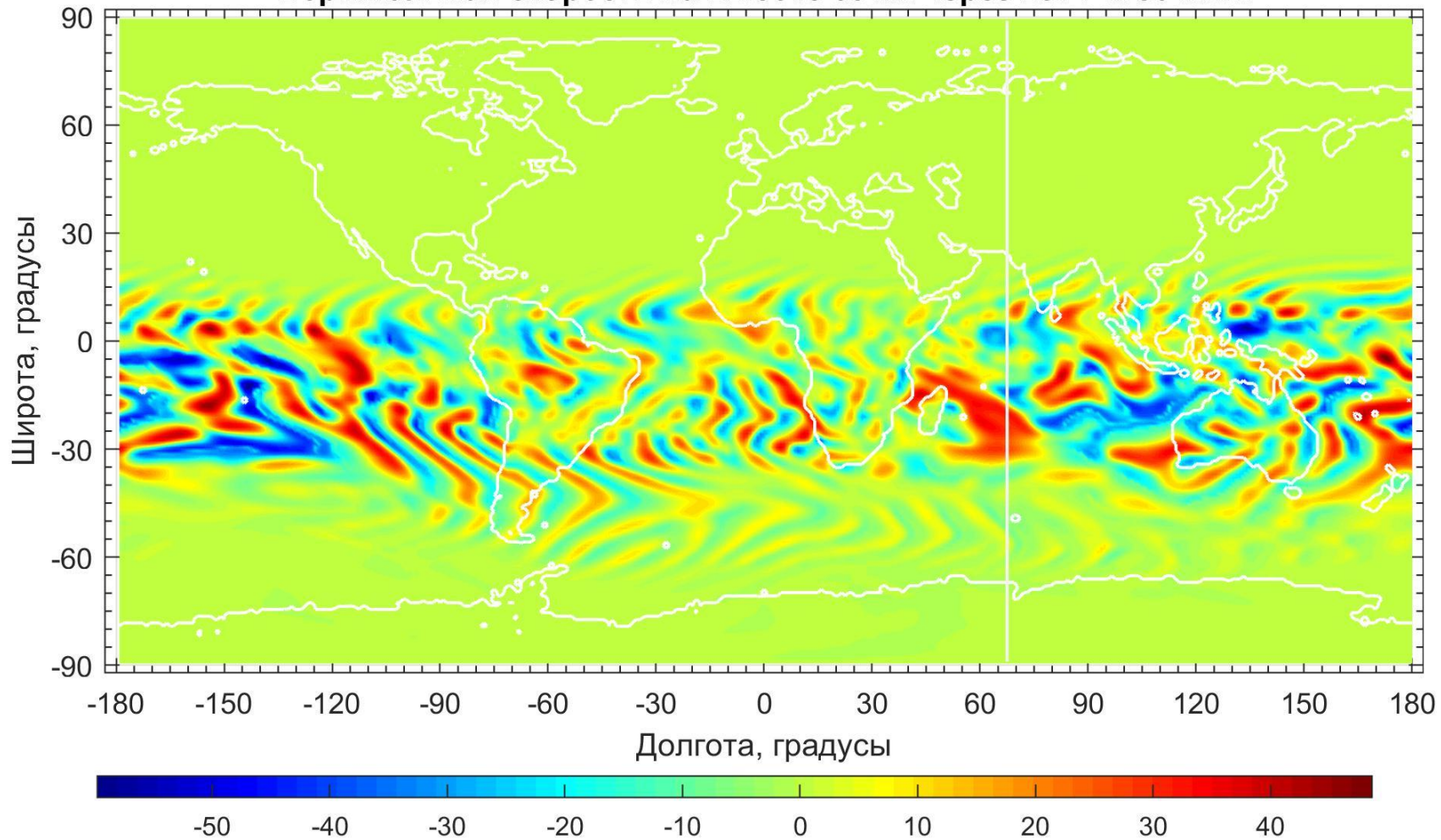
16
июня
UT 7:30

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



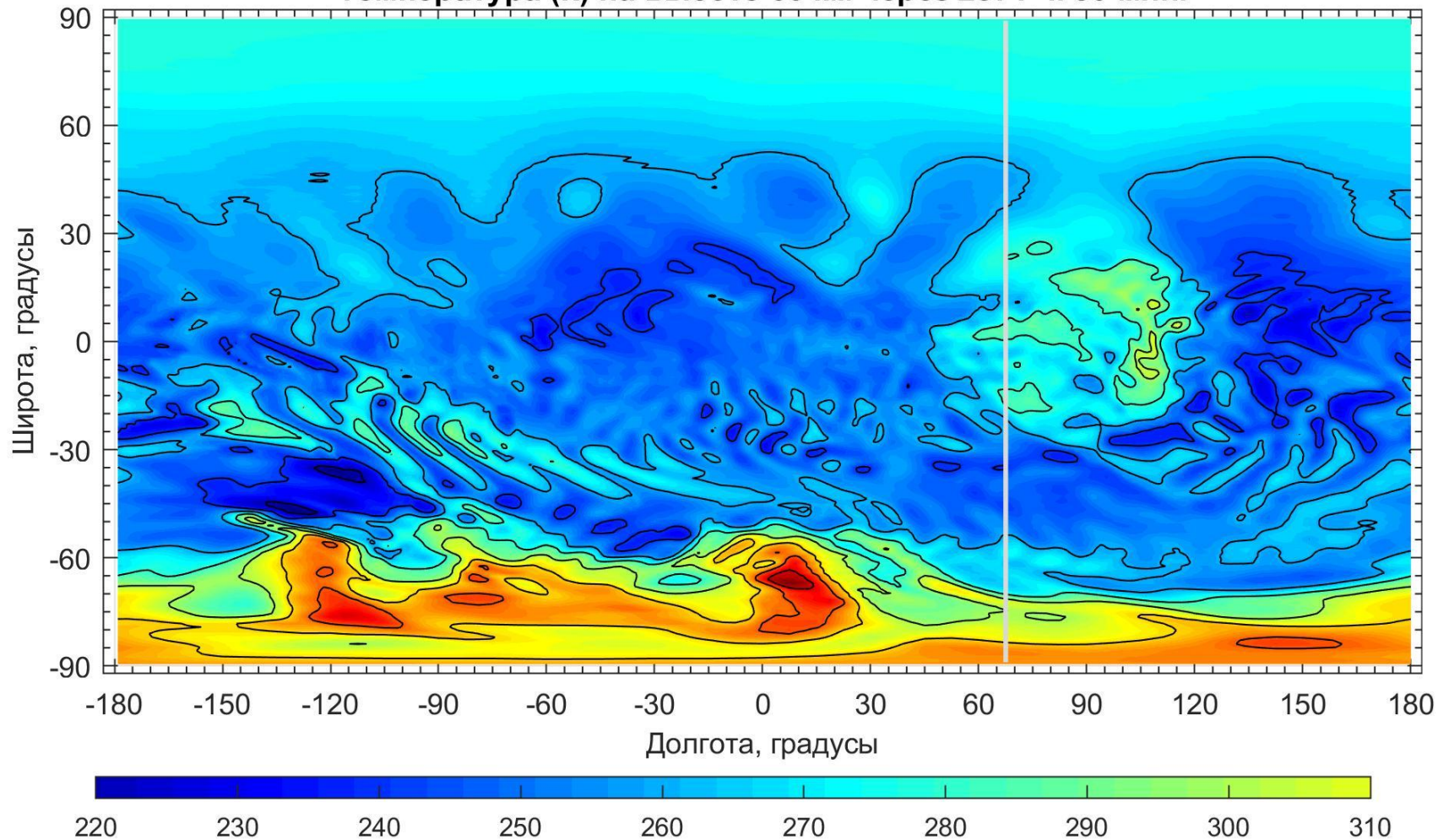
16
июня
UT 7:30

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



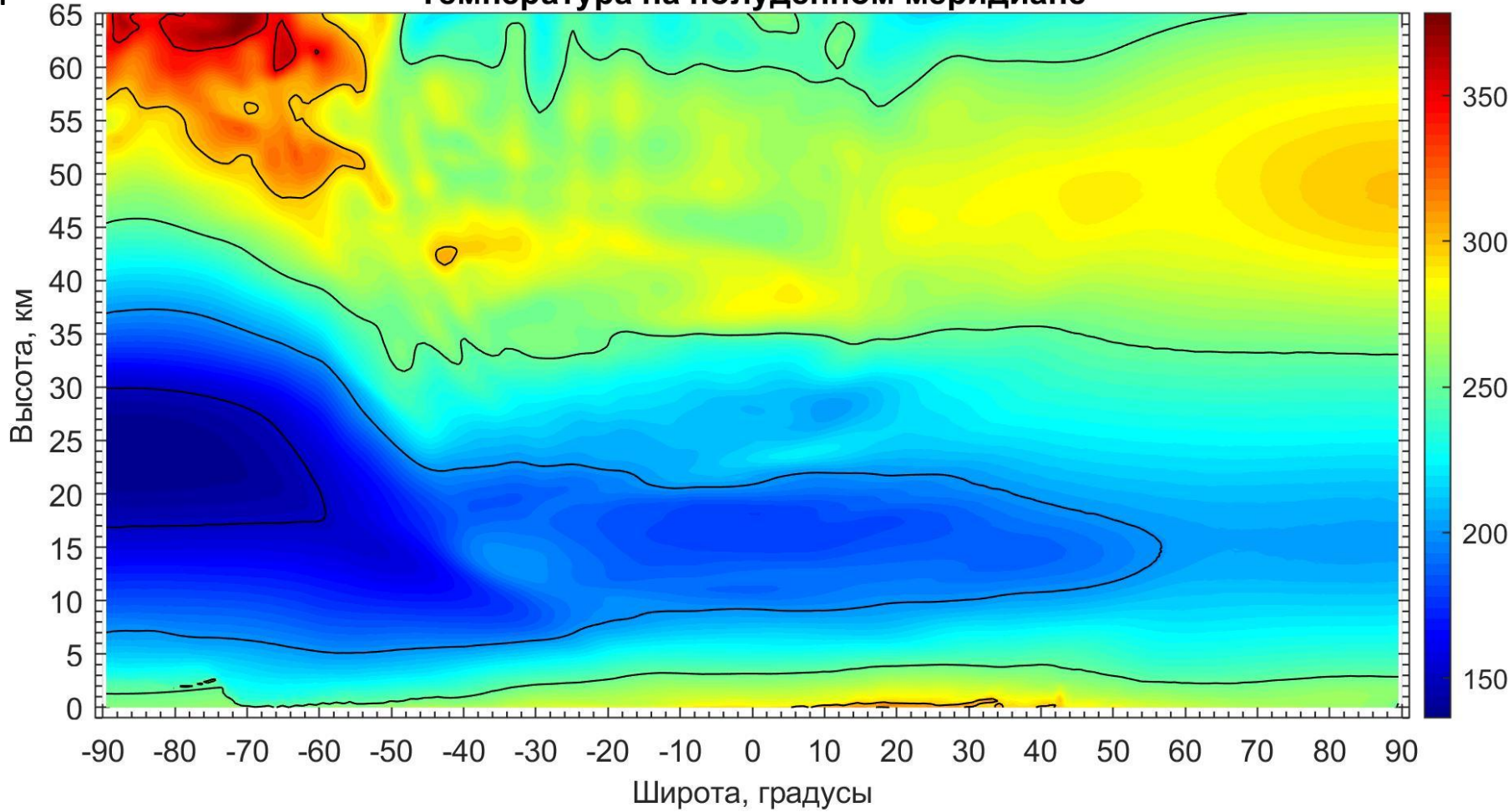
16
июня
УТ 7:30

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. 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.

Результаты моделирования показывают, что в атмосфере могут существовать глобальные системы гравитационных волн, которые имеют период от 15 до 45 минут и горизонтальную длину волны 400-600 км.

Эти волны наиболее заметны в верхней атмосфере и иногда приводят к плавным колебаниям риометрического поглощения D-слоем ионосферы на освещенной стороне в спокойных геофизических условиях при отсутствии высыпаний частиц энергичных частиц из магнитосферы.

Эти волны формируются при обтекании горных систем Анд и Кордильер мощными зональными течениями, которые формируются в нижней тропосфере над Тихим и Атлантическим океанами в ячейках циркуляции Хедли и Ферреля.

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.