

УДК 519.6:551.511

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБЩЕЙ ЦИРКУЛЯЦИИ НИЖНЕЙ И СРЕДНЕЙ АТМОСФЕРЫ ЗЕМЛИ В СЕРЕДИНЕ ЯНВАРЯ

© 2022 г. И. В. Мингалев^{1, 2, *}, К. Г. Орлов¹, Е. А. Федотова¹, В. С. Мингалев¹

¹Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
Полярный геофизический институт, Апатиты, Россия

²Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
“Мурманский арктический государственный университет”, Филиал в г. Апатиты, Апатиты, Россия

*E-mail: mingalev_i@pgia.ru

Поступила в редакцию 15.10.2021 г.

После доработки 05.11.2021 г.

Принята к публикации 22.11.2021 г.

Изложены результаты моделирования общей циркуляции атмосферы Земли в диапазоне высот от 0 до 80 км в середине января с помощью негидростатической модели, в которой с высокой точностью рассчитывается поле солнечного и теплового излучения. Показано, что разработанная авторами модель воспроизводит 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.

DOI: 10.31857/S0367676522030164

ВВЕДЕНИЕ

Нашей научной группой разрабатывается модель общей циркуляции нижней и средней атмосферы Земли, основанная на численном интегрировании полной системы уравнений динамики сжимаемого вязкого атмосферного газа. Цель данной работы состоит в том, чтобы изучить особенности общей циркуляции тропосферы, стратосферы и нижней мезосферы в январе, а также проверить способность нашей модели воспроизводить крупно- и среднемасштабные структуры циркуляции, такие, как конвективные ячейки, циркумполярные вихри, а также циклоны и антициклоны в нижней тропосфере.

В атмосфере Земли постоянно протекают следующие основные физические процессы. Происходит поглощение и рассеяние атмосферным газом солнечного излучения в частотных диапазонах УФ, видимом и ближнем ИК, а также испускание, поглощение и рассеяние собственного излучения и излучения поверхности Земли в дальнем и среднем ИК диапазонах. Постоянно происходит образование облаков, их испарение и движение, а также выпадение осадков. Динамика облаков сильно влияет на нагрев-охлаждение атмосферного газа за счет поглощения и испускания излучения. Еще один важный процесс – это фотохимические и химические процессы, в частности образование и разрушение озона. Концентрация озона сильно

влияет на скорость нагрева атмосферного газа солнечным излучением в стратосфере и мезосфере. Следующий процесс – это движение атмосферного газа, обусловленное полем давления и ускорением внешних массовых сил. Движение сильно влияет на распределения облаков и концентрации озона и, тем самым, на скорость нагрева атмосферного газа излучением. В свою очередь, неравномерный нагрев атмосферного газа излучением оказывает большое влияние на поле давления. Существенную роль играют взаимодействие атмосферного газа с поверхностью Земли и приповерхностный пограничный слой. Точность описания перечисленных процессов определяет качество модели и ее способность воспроизводить общую циркуляцию атмосферы, которая является весьма сложной.

В моделях общей циркуляции атмосферы Земли, которые развиваются более 50 лет, используются разные подходы к описанию движения атмосферы, переноса излучения в ней и динамики облаков, а также используются разные методы для численного интегрирования по времени уравнений движения атмосферы. Анализ достижений в создании этих моделей представлен в работах [1, 2].

По предназначению модели общей циркуляции атмосферы Земли можно разделить на разные группы. В первую группу входят модели, предназначенные для прогноза погоды. В этих моделях

область моделирования простирается от поверхности Земли до высот 25–30 км. Во вторую группу входят модели, предназначенные для моделирования изменений климата. В этих моделях область моделирования обычно простирается от поверхности Земли до высот 40–70 км. В третью группу входят модели, предназначенные для исследования протекающих в атмосфере Земли физических процессов и влияния этих процессов на общую циркуляцию атмосферы. К этой группе относится разрабатываемая авторами этой работы модель общей циркуляции нижней и средней атмосферы. Отдельную группу образуют модели верхней атмосферы Земли.

В настоящее время для глобального среднесрочного прогноза ведущие прогностические центры используют численные негидростатические модели с горизонтальным разрешением 10–30 км. Спектральными полулагранжевыми моделями являются модель ЕЦСПП (ECMWF) [3], модель Navy/FNMOC/NRL (USA; https://cimss.ssec.wisc.edu/itwg/itsc/itsc17/overview_baker.pdf), модель Метео-Франс (Météo France) [4] и модель JMA (Japan). Негидростатическими моделями, использующими разностную дискретизацию по широте и долготе, являются модель Met Office (UK) [5], модели ICON [6, 7], ICON-IAP [8] и модель DWD (Germany) [7], и последняя версия модели GFS (NCEP USA; https://www.emc.ncep.noaa.gov/users/Eric.Rogers/documents/FV3GFS_OD_Briefs_10-01-18_4-1-2019.pdf).

Существуют две отечественные модели для глобального среднесрочного прогноза: модель ПЛАВ [9, 10] и спектральная модель Гидрометцентра России [11]. В этих моделях используется приближение гидростатики. В последних версиях модели ПЛАВ описание радиационного нагрева и подсчетных процессов в целом соответствует моделям ведущих прогностических центров. В модели Гидрометцентра России используется существенно более грубое описание радиационного нагрева. Имеются региональные негидростатические модели прогноза погоды, например, европейская модель COSMO (<http://www.cosmo-model.org/content/model/documentation/core/default.htm>), и американские модель WRF-ARW, разработанная в NCAR (<http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users>), и модель WRF-NMM, разработанная в NCEP [12].

В настоящее время наиболее совершенными моделями климатической системы являются две модели. Первая из них – это модель AM3, созданная в Лаборатории геофизической гидродинамики США (GFDL). Подробное описание этой модели приведено в [13]. Модель AM3 является частью модели Земной системы, которая также создана в этой лаборатории. В этой модели используется сетка кубическая сфера и учитываются перенос 85 малых газовых составляющих и хи-

мические реакции между ними, а также динамика 20 компонент аэрозолей, и, кроме того, учитывается влияние аэрозолей на процесс образования капель в облаке. Вторая модель – это свободно распространяемая модель CAM5, созданная в Национальном центре атмосферных исследований (NCAR). Подробное описание модели приведено по ссылке http://www.cesm.ucar.edu/models/cesm1.2/cam/docs/description/cam5_desc.pdf. Модель CAM5 является составной частью совместной модели Земной системы CESM1. В этой модели можно использовать 4 различных блока решения уравнений динамики атмосферы: конечно-объемный эйлеров по горизонтали, лагранжев по вертикали на равномерной широтно-долготной сетке; блок с использованием спектральных элементов на кубической сфере, а также спектральный эйлеров и конечно-разностный полулагранжев. В эту модель включены блок описания микрофизических процессов в облаках, а также блок атмосферной химии, который описывает основные процессы, связанные с малыми газовыми составляющими и аэрозолями. Также имеются так называемые химико-климатические модели, такие как модель SOCOL [14], которые предназначены для моделирования климата с детальным учетом фотохимических реакций в нижней и средней атмосфере.

На высотах более 20 км линии поглощения атмосферных газов становятся очень узкими, а коэффициент молекулярного поглощения очень быстро изменяется при изменении частоты. Для гарантированного достижения точности 1% и лучше при расчетах поля излучения разрешение по частоте должно составлять примерно 0.001 см^{-1} . Расчеты с таким высоким разрешением по частоте называются полилинейными или эталонными (line by line) и требуют столь больших вычислительных затрат, что их нельзя использовать в модели общей циркуляции атмосферы в настоящее время и в обозримом будущем.

Во всех вышеупомянутых моделях применяются методы быстрого расчета потоков излучения, основанные на замене реальной зависимости коэффициента молекулярного поглощения от частоты на более удобную для расчетов модельную зависимость. При этом узкие спектральные каналы, лежащие в достаточно большом частотном интервале, по определенному алгоритму объединяются в группы так, чтобы у каналов из одной группы оптические параметры атмосферного газа были близки между собой. Каждая группа заменяется на один широкий модельный канал. В итоге несколько миллионов узких спектральных каналов заменяются на несколько десятков или несколько сотен модельных каналов. Процедуру построения указанных модельных каналов называют построением параметризации молекулярного поглощения. Для проверки точности построенной параметризации результаты расчета поля

излучения в модельных каналах сравниваются с результатами эталонных расчетов, в которых шаг сетки по частоте в несколько раз меньше полуширины контуров линий поглощения атмосферных газов на верхней границе области моделирования.

Отметим, что при построении параметризации молекулярного поглощения для расчета поля излучения на высотах 0–70 км нужно учитывать, что ниже высоты 15 км вклад водяного пара в коэффициент молекулярного поглощения является существенным, а вклад озона мал, а выше высоты 20 км снижается вклад водяного пара и возрастает вклад озона. По этой причине спектры поглощения на малых и больших высотах существенно отличаются.

В радиационных блоках всех вышеупомянутых моделей применяются параметризации, обеспечивающие хорошую точность (в пределах 0.5 К/сут) расчетов скоростей нагрева-выхолаживания атмосферы только на высотах до 20 км в безоблачной атмосфере. На высотах более 25 км точность указанных параметризаций существенно ухудшается из-за того, что при построении этих параметризаций не учитывались различия спектров поглощения в средней и нижней атмосфере. Другой недостаток радиационных блоков существующих моделей заключается в том, что в этих блоках при численном решении уравнения переноса излучения используется двухпотокное приближение, которое заведомо не может обеспечить приемлемую точность расчета при наличии облачных слоев.

КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ ТЕКУЩЕЙ ВЕРСИИ МОДЕЛИ

Динамическое ядро нашей модели описано в работе [15] и основано на численном интегрировании полной системы уравнений динамики сжимаемого вязкого атмосферного газа на пространственной сетке с высоким разрешением с помощью явной консервативной схемы, которая имеет 2 порядок точности по времени и 3 по пространственным переменным. В модели учитываются рельеф земной поверхности и используется равномерная сетка по высоте с шагом 200 м и специальная сетка по широте и долготе, которая является комбинацией нескольких широтно-долготных сеток с постоянным шагом. У всех сеток шаг по широте одинаков и составляет 15/32 град (384 узла по широте). Ближайшие к полюсам узлы сетки удалены от полюсов по широте на половину шага. Максимальный шаг сетки по долготе используется вблизи полюсов на расстоянии по широте менее 1.5 град. Когда расстояние по широте от ближайшего полюса лежит в пределах от 1.5 до 3 град, используется шаг сетки по долготе в 2 раза меньше, чем вблизи полюсов. Когда расстояние по широте от ближайшего полюса лежит в пределах

от 3 до 7 град, используется шаг сетки по долготе в 4 раза меньше, чем вблизи полюсов. Когда расстояние по широте от ближайшего полюса лежит в пределах от 7 до 15 град, используется шаг сетки по долготе в 8 раз меньше, чем вблизи полюсов. Когда расстояние по широте от ближайшего полюса лежит в пределах от 15 до 30 град, используется шаг сетки по долготе в 16 раз меньше, чем вблизи полюсов. Когда расстояние по широте от ближайшего полюса превышает 30 град, используется шаг сетки по долготе в 32 раза меньше, чем вблизи полюсов. В текущем варианте этот шаг составляет на низких широтах 15/32 град (768 узлов по долготе). Описанная сетка не имеет сильного сгущения узлов вблизи полюсов. Верхняя граница области моделирования была расположена на высоте 85 км над уровнем океана.

В радиационном блоке нашей модели используются две новые параметризации молекулярного поглощения, одна из которых предназначена для расчета поля собственного излучения атмосферы в диапазоне частот от 10 до 2000 см⁻¹ [16, 17], а вторая предназначена для расчета поля солнечного излучения в диапазоне частот от 2000 до 50000 см⁻¹ в интервале высот от поверхности Земли до 100 км. При построении этих параметризаций учитывается изменение спектров поглощения атмосферы с высотой из-за изменения вкладов водяного пара и озона, а также учитывается нарушение локального 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 вместо двухпотокного приближения и используется метод дискретных ординат и расчетная сетка по зенитным углам с шагом около 9 град [18], что обеспечивает расчет полей солнечного и теплового излучения с учетом сильного рассеяния в облаках.

В текущей версии модели температура поверхности Земли и пространственные распределения концентрации озона и других малых составляющих воздуха, важных для расчета поля излучения не рассчитываются, а заданы по аналитическим формулам, которые аппроксимируют имеющиеся экспериментальные данные. В нашу модель пока не включены полноценные блок расчета концентрации озона, блок расчета температуры поверхности Земли и блок расчета концентраций и размеров различных аэрозольных частиц, определяющих динамику облаков (аэрозольный блок). Также в текущей версии модели атмосфера считается безоблачной. После включения в нашу модель полноценного аэрозольного блока планируется сравнить результаты расчетов и определить,

как влияет учет облачности на общую циркуляцию атмосферы.

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 скорости осредненного течения. В нижней тропосфере над океанами сформировались ячейки циркуляции Хедли, Ферреля и приполюсные ячейки.

На рис. 1–5 представлены распределения различных компонент скорости ветра и температуры для момента времени 16 января UT 13:30. На рис. 1 представлены распределения горизонтальных компонент скорости ветра на высотах 1 и 10 км над уровнем моря, на рис. 2 – распределения этих же компонент на высоте 20 км и распределение зональной компоненты ветра в вертикальном разрезе вдоль полуденного меридиана, на котором расположена подсолнечная точка. На рис. 3 и 4 представлены распределения горизонтальной и вертикальной компонент ветра на высотах 40 и 60 км над уровнем моря соответственно. На всех рисунках стрелки указывают направление горизонтальной составляющей ветра, а их длина и цвет фона указывают ее абсолютную величину. Сплошные белые линии указывают границы материков. На рис. 5 представлены распределения температуры на высоте 60 км и в вертикальном разрезе вдоль полуденного меридиана, на котором расположена подсолнечная точка, в которой Солнце находится в зените.

На верхней части рис. 1 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 поворачивается 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, причём 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.

На нижней части рис. 1 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 про-

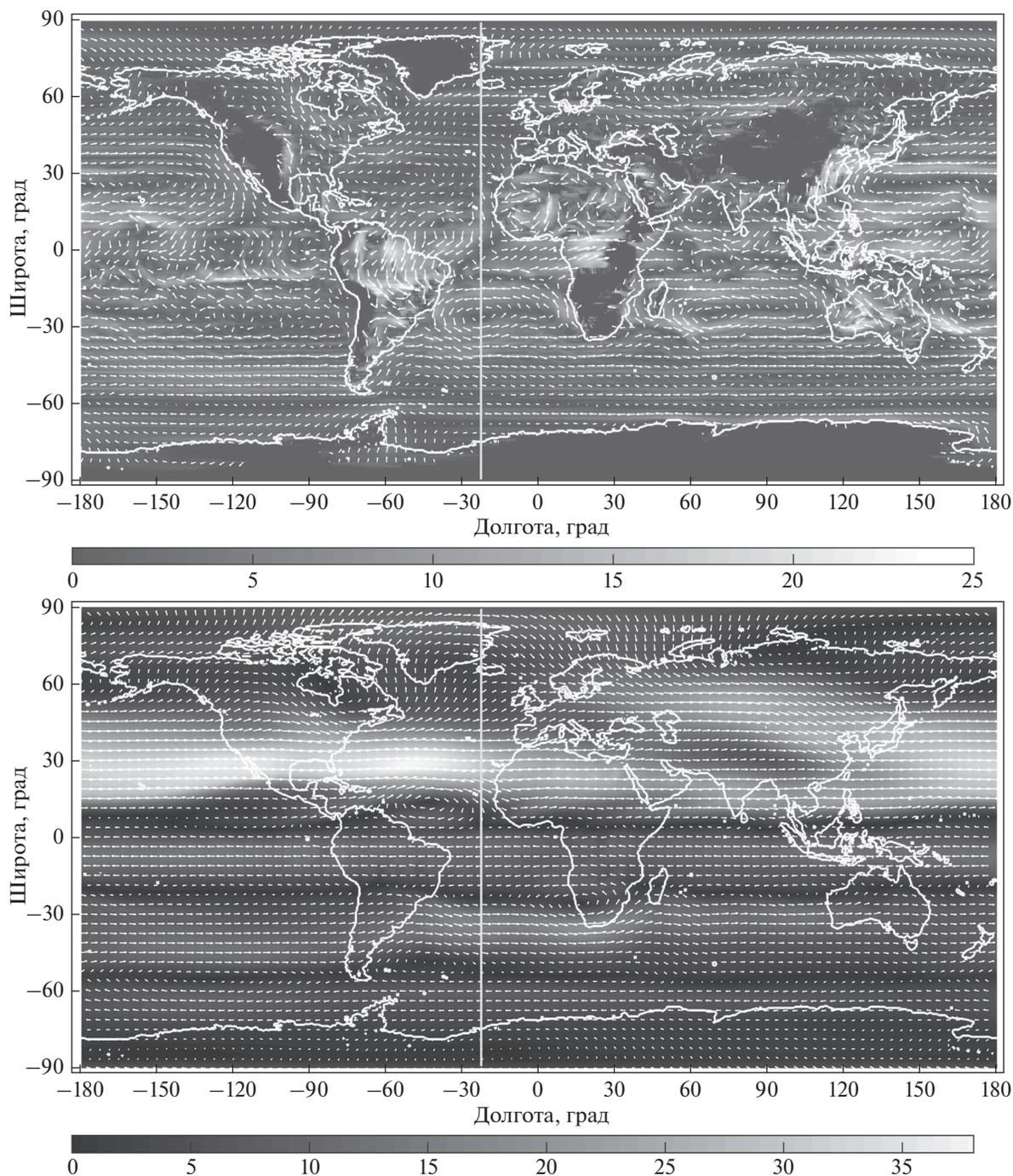


Рис. 1. Распределения горизонтальной компоненты ветра в м/с на высотах 1 (вверху) и 10 км (внизу) над уровнем моря. Стрелки указывают направление горизонтальной составляющей ветра, а их длина и цвет фона указывают ее абсолютную величину. Сплошные белые линии указывают границы материков.

тивоположным 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 ши-

ротой 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

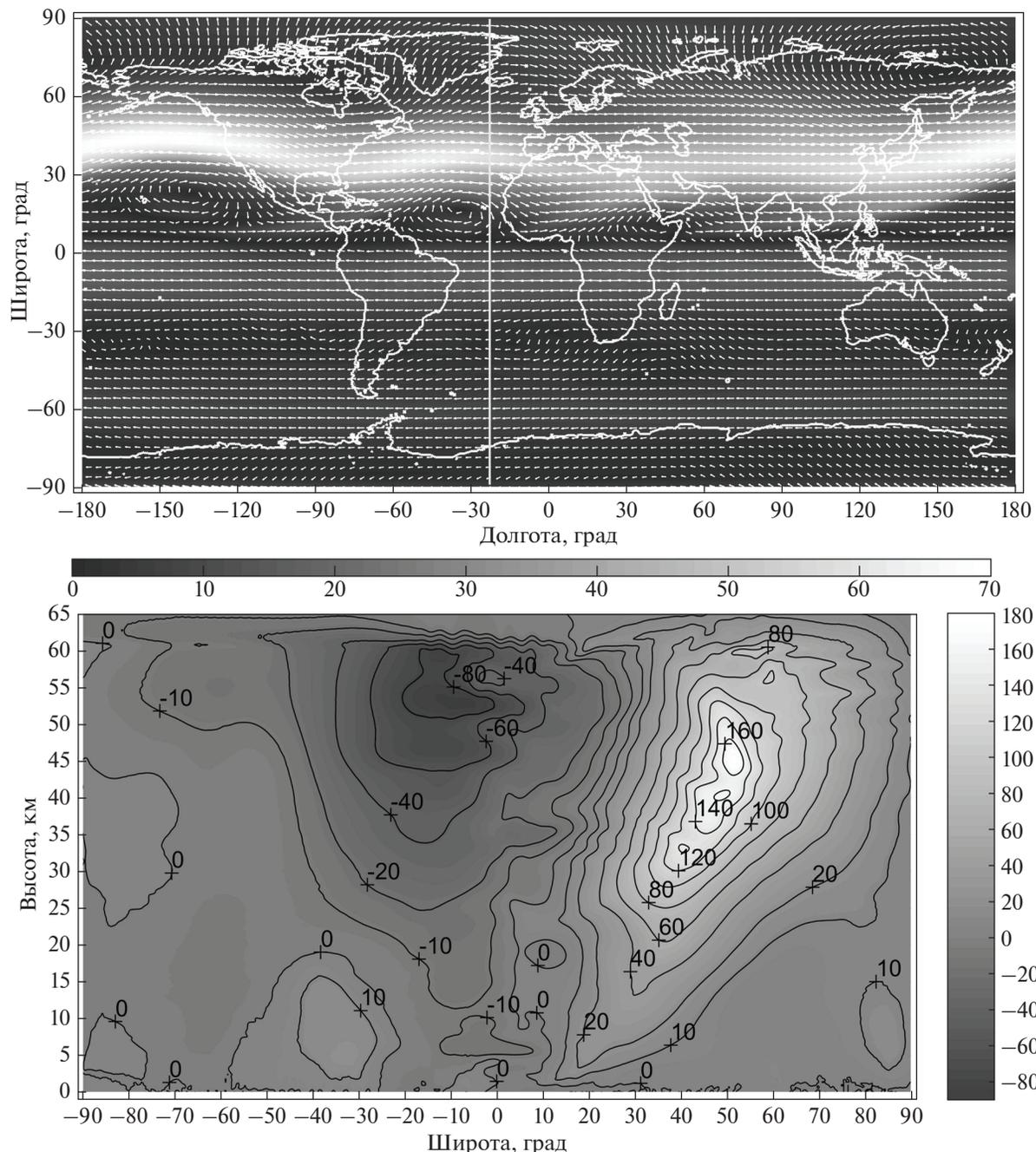


Рис. 2. Вверху распределение в м/с горизонтальной компоненты ветра на высоте 20 км над уровнем моря, а внизу распределение зональной компоненты ветра в вертикальном разрезе вдоль меридиана, на котором расположена подсолнечная точка.

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.

На верхней части рис. 2 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 те-

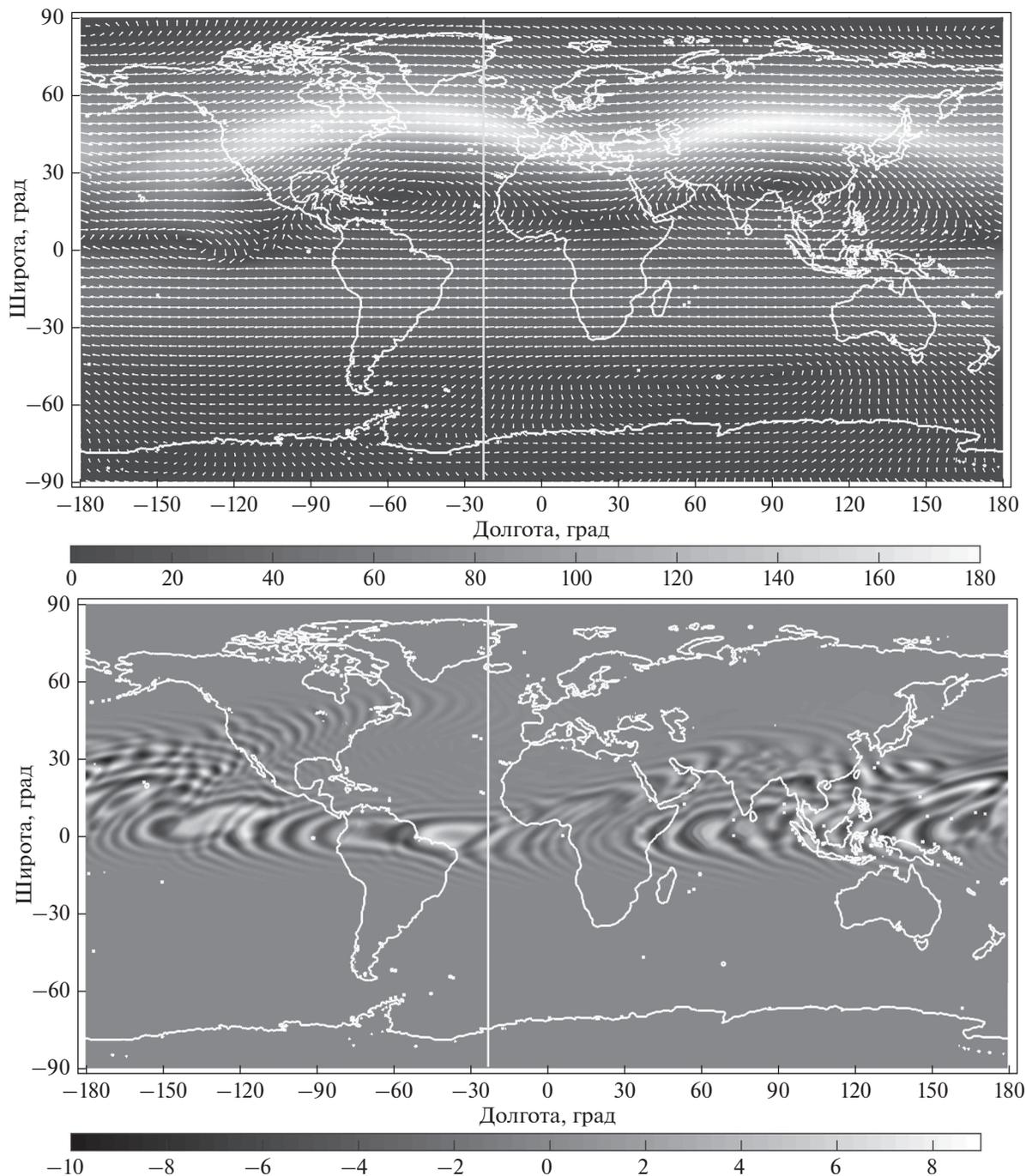


Рис. 3. Распределения горизонтальной (вверху) и вертикальной (внизу) компонент ветра в м/с на высоте 40 км над уровнем моря.

чение, 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 тече-

ние, направленное преимущественно с запада на восток. В этом течении абсолютная величина скорости ветра достигает 60–70 м/с.

На верхней части рис. 3 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

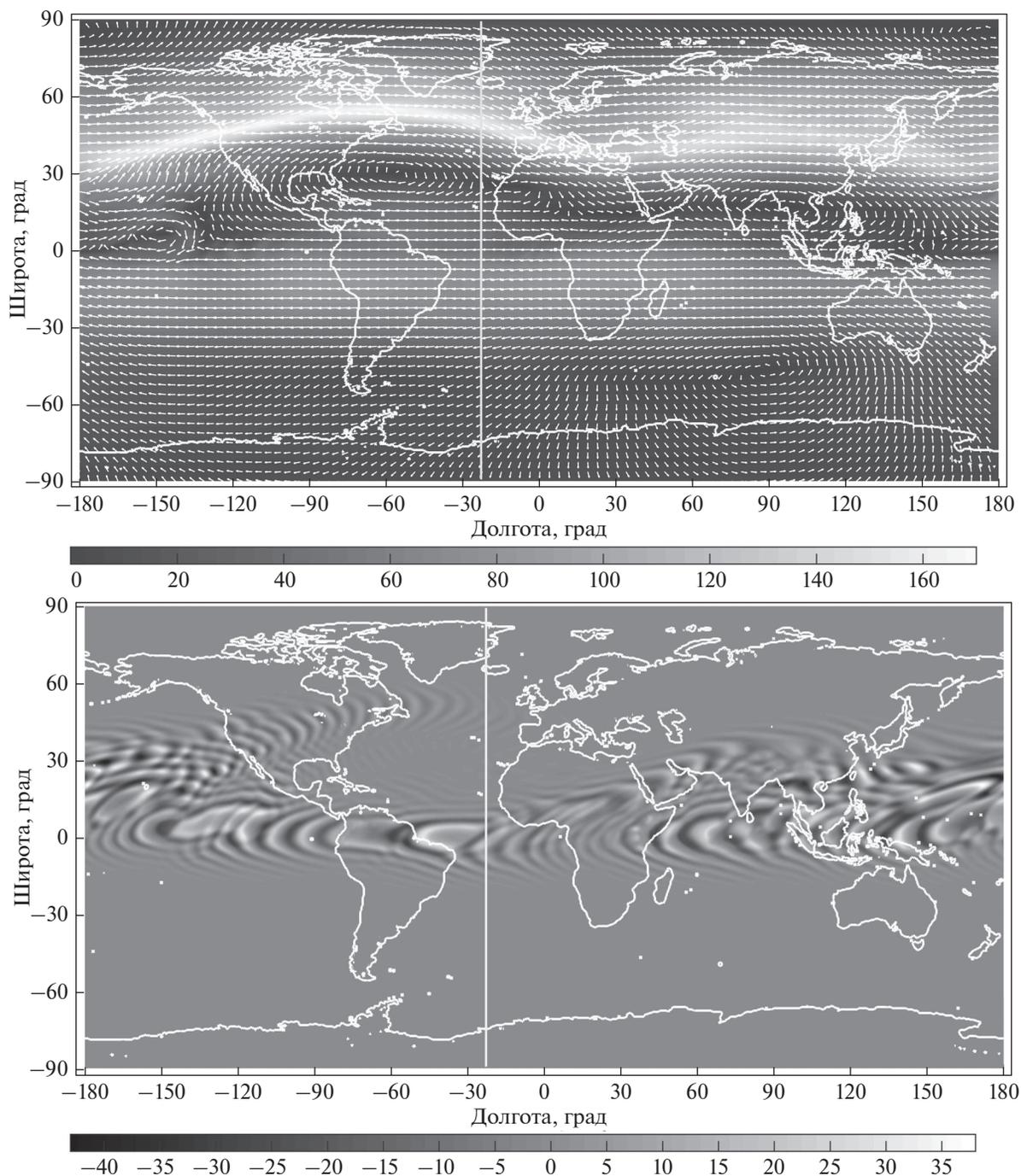


Рис. 4. Распределения горизонтальной (вверху) и вертикальной (внизу) компонент ветра в м/с на высоте 60 км над уровнем моря.

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.

На верхней части рис. 4 видно, что на высоте 60 км над уровнем моря распределение горизон-

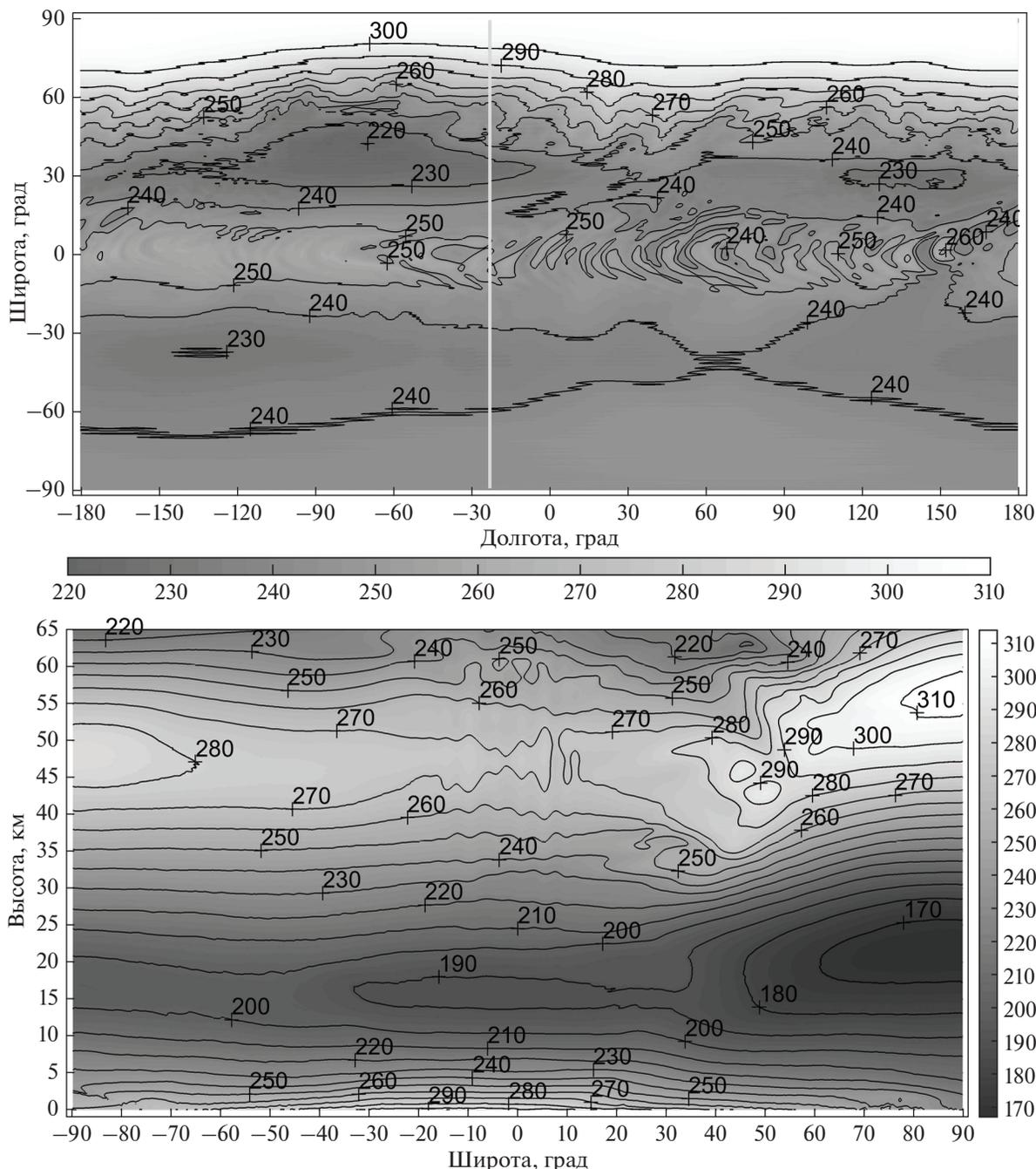


Рис. 5. Распределения температуры воздуха в К на высоте 60 км над уровнем моря (вверху), и в вертикальном разрезе вдоль меридиана, на котором расположена подсолнечная точка (внизу).

тальной 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 преимуществен-

но 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.

На нижней части рис. 2 видно, что в южном полушарии на высотах от 20 до 65 км имеется цир-

кумполярное 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.

На нижней части рис. 3 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. На нижней части рис. 4 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.

На верхней части рис. 5 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 неод-

родности температуры, в которых она меняется в пределах от 235 до 265 К.

На нижней части рис. 5 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° . Таким образом, в рассчитанной циркуляции атмосферы верхняя стратосфера и нижняя мезосфера зимнего полушария в полярной области существенно теплее, чем на средних широтах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Одним из результатов моделирования является наличие над океанами приземных ячеек меридионально-вертикальной циркуляции. В южном полушарии получились три ячейки: приполюсная, Ферреля и Хедли. В северном полушарии над Тихим и Атлантическим океанами также получились три перечисленные ячейки. При этом циркуляция в ячейках Ферреля и Хедли получилась более интенсивная, чем в приполюсной ячейке. Континентальные горные системы разрушают эти ячейки. Важным результатом моделирования является наличие крупномасштабных вихрей и сдвиговых течений в тропосфере и стратосфере. Эти вихри играют важную роль в переносе тепла, водяного пара и озона. Сдвиговые течения являются источниками возникновения этих вихрей при развитии сдвиговой неустойчивости, которая может возникать в этих течениях.

Также важным результатом моделирования является наличие опоясывающей Землю области, расположенной на широтах от -15° до 60° , 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 мин. Величина вертикальной компоненты скорости 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 скорости ветра обусловлены системой горных подветренных волн, которые возникают при обтекании горных систем горизонтальными потоками с достаточно большой скоростью ветра. На распространение этих волн вверх от поверхности сильно влияет вертикальный градиент горизонтального ветра.

Другим важным результатом моделирования являются циркумполярные вихри в обоих полу-

шарях 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. При таких перемещениях воздушных масс вектор их гидродинамической скорости из-за действия силы Кориолиса приобретает большую зональную компоненту, которая становится намного больше меридиональной компоненты этого вектора.

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 расположенному вблизи Северного полюса центру циркумполярного вихря.

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 зимнем полушарии верхней части стратосферы и нижней мезосферы в полярной области по сравнению с областью средних широт.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Четверушкин Б.Н., Мингалева И.В., Четечкина В.М. и др. // Мат. модел. 2020. Т. 32. № 11. С. 29; *Chetverushkin V.N., Mingalev I.V., Chechetkin V.M. et al. // Math. Models Comput. Simul.* 2021. V. 13. No. 4. P. 561.
2. Толстых М.А. // Тр. Гидромет. науч.-иссл. центра РФ. 2016. № 359. С. 5.
3. Hortal M. // Proc. ECMWF Workshop on Diagnosis of Data Assimilation Systems (Reading, 1998). P. 50.
4. Courtier P., Freyrier C., Geleyn J.-F. et al. // Proc. ECMWF Seminar on Numerical Methods in Atmospheric Models. V. 2. (Reading, 1991). P. 192.
5. Staniforth A., Melvin T., Wood N. // Proc. ECMWF Seminar on Numerical Methods for Atmosphere and Ocean Modelling. (Reading, 2013). P. 15.
6. Wan Y., Giorgetta M.A., G. Zängl G. et al. // *Geosci. Model Dev.* 2013. V. 6. P. 735.
7. Zängl G., Reinert D., Ripodas P., Baldauf M. // *Quart. J. Royal Meteorol. Soc.* 2015. V. 141. P. 563.
8. Gassmann A. // *Quart. J. Royal Meteorol. Soc.* 2013. V. 139. P. 152.
9. Толстых М.А., Желен Ж.Ф., Володин Е.М. и др., // *Метеорол. и гидрол.* 2015. № 6. С. 25; *Tolstykh M.A., Geleyn J.F., Volodin E.M. et al. // Russ. Meteorol. Hydrol.* 2015. No. 6. P. 374.
10. Толстых М.А., Фадеев Р.Ю., Шашкин В.В. и др. // *Гидромет. иссл. и прогн.* 2019. № 4(374). С. 77.
11. Розинкина И.А., Астахова Е.Д., Цветков В.И. и др. // *Гидромет. иссл. и прогн.* 2019. № 4(374). С. 54.
12. Ek M.B., Mitchel K.E., Lin Y. et al. // *J. Geophys. Res.* 2003. V. 108. No. D22. Art. No. 8851.
13. Donner L., Wyman B.L., Hemler R.S. et al. // *J. Climate.* 2011. V. 24. P. 3484.
14. Muthers S., Ane J.G., Stenke A. et al. // *Geosci. Model Dev. Discuss.* 2014. V. 7. P. 3013.
15. Четверушкин Б.Н., Мингалева И.В., Орлов К.Г. и др. // *Мат. модел.* 2017. Т. 29. № 8. С. 59; *Chetverushkin B.N., Mingalev I.V., Orlov K.G. et al. // Math. Models Comput. Simul.* 2018. V. 10. No. 2. P. 176.
16. Мингалева И.В., Федотова Е.А., Орлов К.Г. // *Опт. атм. и океана.* 2018. Т. 31. № 10. С. 779; *Mingalev I.V., Fedotova E.A., Orlov K.G. // Atm. Ocean. Opt.* 2018. V. 31. No. 6. P. 582.
17. Четверушкин Б.Н., Мингалева И.В., Федотова Е.А. и др. // *Мат. модел.* 2020. Т. 32. № 2. С. 77; *Chetverushkin B.N., Mingalev I.V., Fedotova E.A. et al. // Math. Models Comp. Simul.* 2020. V. 12. No. 5. P. 803.
18. Игнатьев Н.И., Мингалева И.В., Родин А.В., Федотова Е.А. // *Журн. выч. мат. и мат. физ.* 2015. Т. 55. № 10. С. 1741; *Ignat'ev N.I., Mingalev I.V., Rodin A.V., Fedotova E.A. // Comp. Math. Math. Phys.* 2015. V. 55. No. 10. P. 1713.
19. Picone J.M., Hedin A.E., Drob D.P., Aikin A.C. // *J. Geophys. Res.* 2002. V. 107. No. A12. P. 1468.

Numerical simulation of the general circulation of the lower and middle Earth's atmosphere in mid-January

I. V. Mingalev^{a, b, *}, K. G. Orlov^a, E. A. Fedotova^a, V. S. Mingalev^a

^a Polar Geophysical Institute, Apatity, 184209 Russia

^b Apatity Branch of the Murmansk Arctic State University, Apatity, 184209 Russia

*e-mail: mingalev_i@pgia.ru

The results of modeling the general circulation of the Earth's atmosphere in the altitude range from 0 to 80 km in mid-January using a non-hydrostatic model, in which the field of solar and thermal radiation is calculated with high accuracy, are presented. It is shown that the model developed by the authors reproduces surface cells of the meridional-vertical circulation over the oceans, large-scale vortices, mountain leeward waves, the rise of the tropopause over the winter polar region, circumpolar vortices and warming in the upper part of the stratosphere and lower mesosphere in the polar region of the winter hemisphere.