

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ВЛИЯНИЯ ЗЕМНОГО РЕЛЬЕФА НА
КРУПНОМАСШТАБНУЮ
ЦИРКУЛЯЦИЮ АТМОСФЕРЫ
АРКТИКИ В ЗИМНИХ УСЛОВИЯХ**

И.В. Мингалев, К.Г. Орлов, В.С. Мингалев

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
«Полярный геофизический институт»,
г. Апатиты, Россия

Методом математического моделирования проведено исследование влияния рельефа планеты на циркуляцию нижней и средней арктической атмосферы Земли.

Применена математическая модель общей циркуляции атмосферы Земли, которая основывается на численном решении системы газодинамических уравнений в слое, окружающем Землю глобально и простирающемся от ее поверхности до высоты 75 км, и которая позволяет рассчитывать трехмерные глобальные распределения зональной, меридиональной и вертикальной компонент скорости нейтрального ветра, температуры и плотности атмосферного газа.

Применяемая численная модель является негидростатической, в ней вертикальная скорость газа находится путем численного решения полного уравнения движения для вертикальной составляющей скорости без пренебрежения какими-либо членами.

При этом все три компоненты скорости рассчитываются при помощи численного решения полных уравнений движения вязкого сжимаемого газа, и условие гидростатического равновесия не применяется в отличие от того, как это делается в большинстве моделей атмосферной циркуляции. Негидростатичность модели позволяет получать с ее помощью более точные результаты, чем с использованием гидростатических моделей.

В применяемом варианте математической модели температура воздуха находится путем решения уравнения теплопроводности для него. При вычислении входящей в это уравнение удельной мощности нагрева-охлаждения атмосферного газа за счет поглощения-испускания электромагнитного излучения использовано релаксационное приближение, в котором эта удельная мощность считается пропорциональной разности между рассчитываемой температурой и так называемой релаксационной температурой, которая задается. В качестве релаксационной температуры берется глобальное распределение температуры, определяемое по эмпирической модели NRLMSISE-00.

Метод конечных разностей применяется для численного решения моделирующих уравнений, и при этом используется нерегулярная треугольная сетка в пространстве географических координат широта-долгота. Шаги сетки по долготе и широте задаются одинаковыми и равными 0.47° , а шаг сетки по высоте равен 200 м.

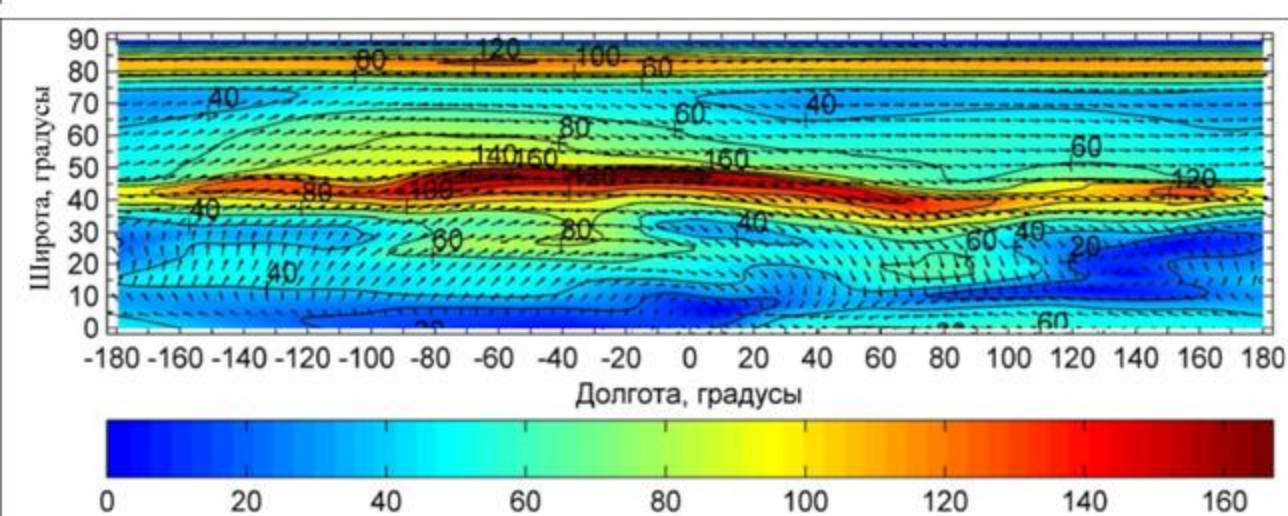
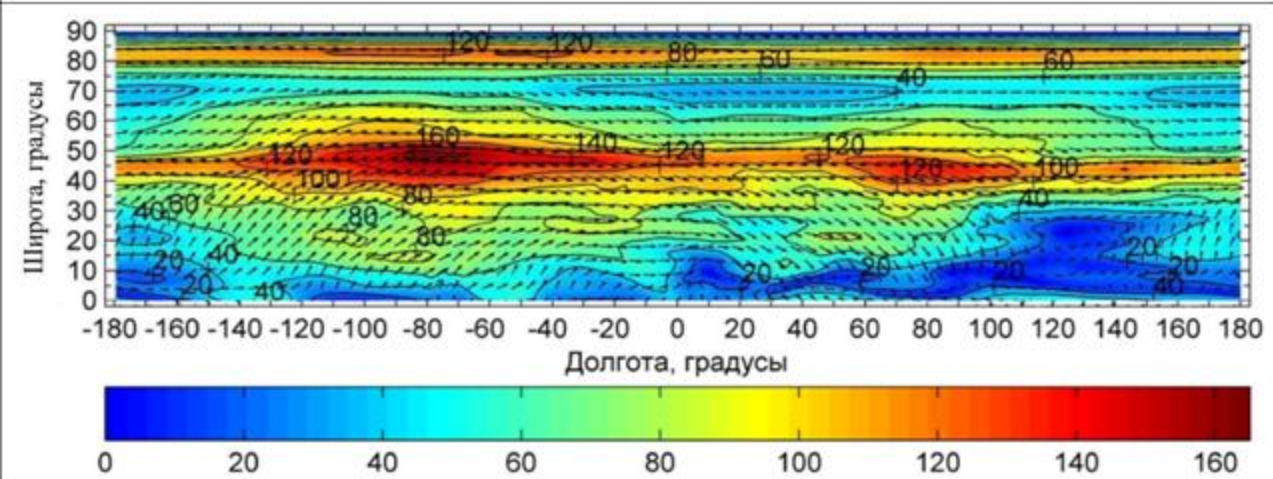
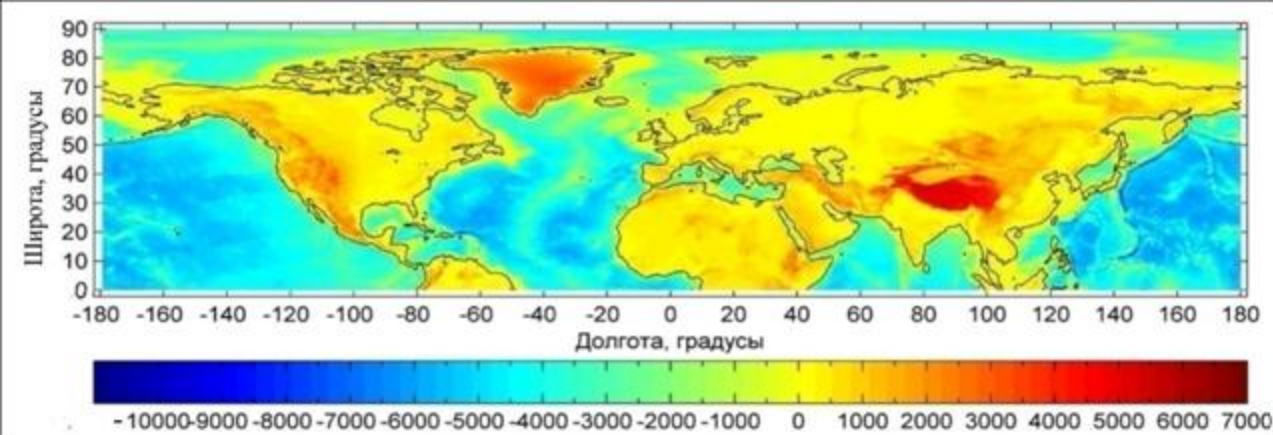
Использованы два варианта этой математической модели, в которых предполагается, что Земля имеет форму сплюснутого с полюсов эллипсоида вращения, причем в первом варианте поверхность планеты считается гладкой, а во втором варианте модели учитывается рельеф земной поверхности.

Для исследования влияния рельефа планеты на циркуляцию нижней и средней арктической атмосферы Земли были выполнены численные расчеты общей циркуляции атмосферы по двум указанным вариантам математической модели для январских условий, и было проведено сравнение полученных результатов.

Оказалось, что полученные по двум используемым вариантам математической модели результаты обладают рядом общих свойств.

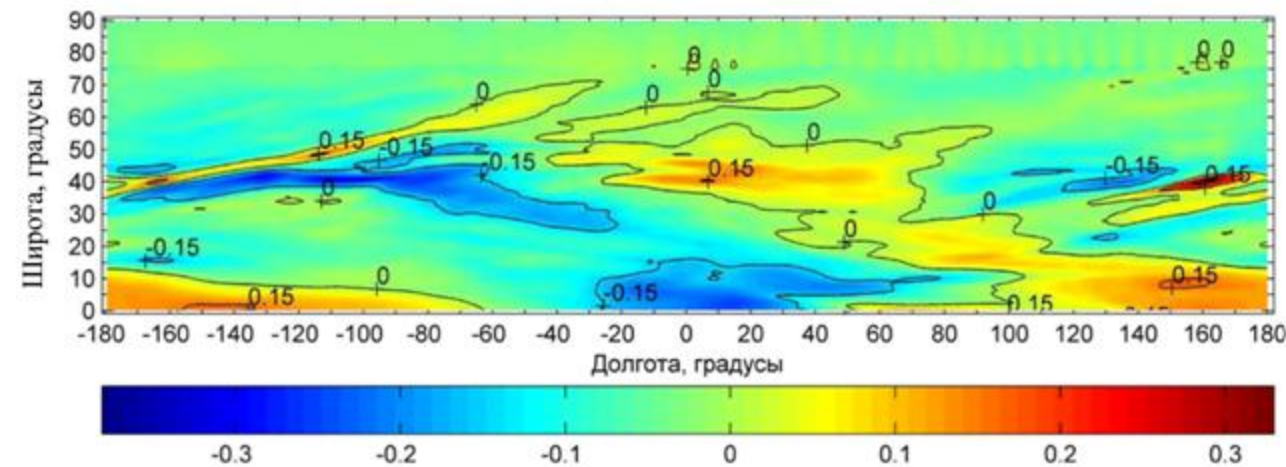
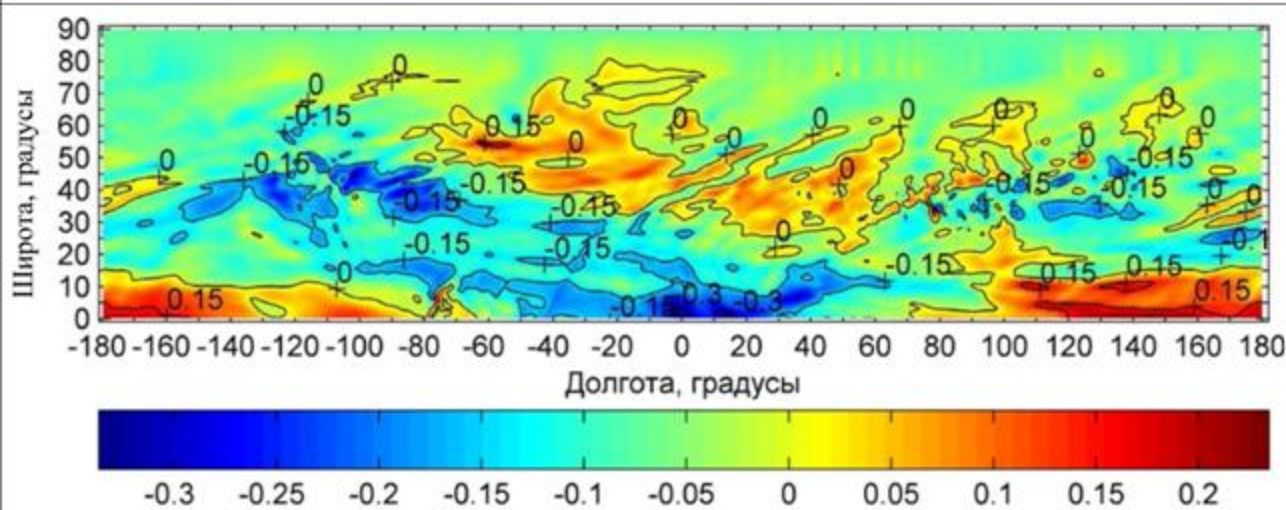
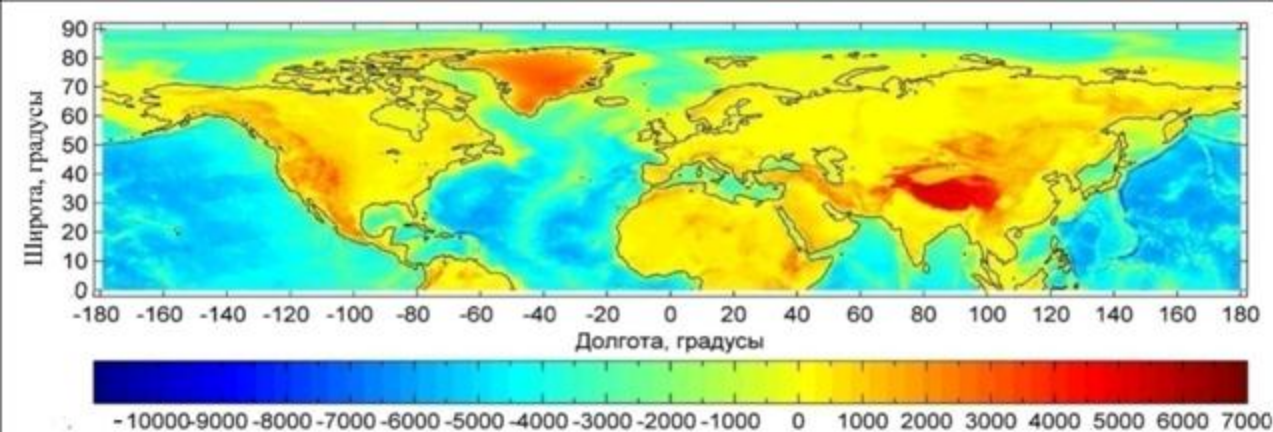
Так в обоих случаях после начала расчетов пространственные распределения вычисляемых параметров начинают резко отходить от своих первоначальных значений, которые были заданы начальными условиями. В ходе дальнейших расчетов их изменения постепенно принимают квазипериодический характер, отражающий их суточные колебания. По истечении примерно 1000 часов физического времени результаты расчетов начинают хорошо воспроизводить суточную вариацию атмосферных параметров, которая обусловлена вращением Земли вокруг своей оси.

После того, как расчеты вышли на квазипериодический режим, для момента 20.00 UT мы рассчитали и построили на разных высотных уровнях пространственные распределения скорости горизонтального и вертикального ветра, полученные по двум вариантам математической модели.



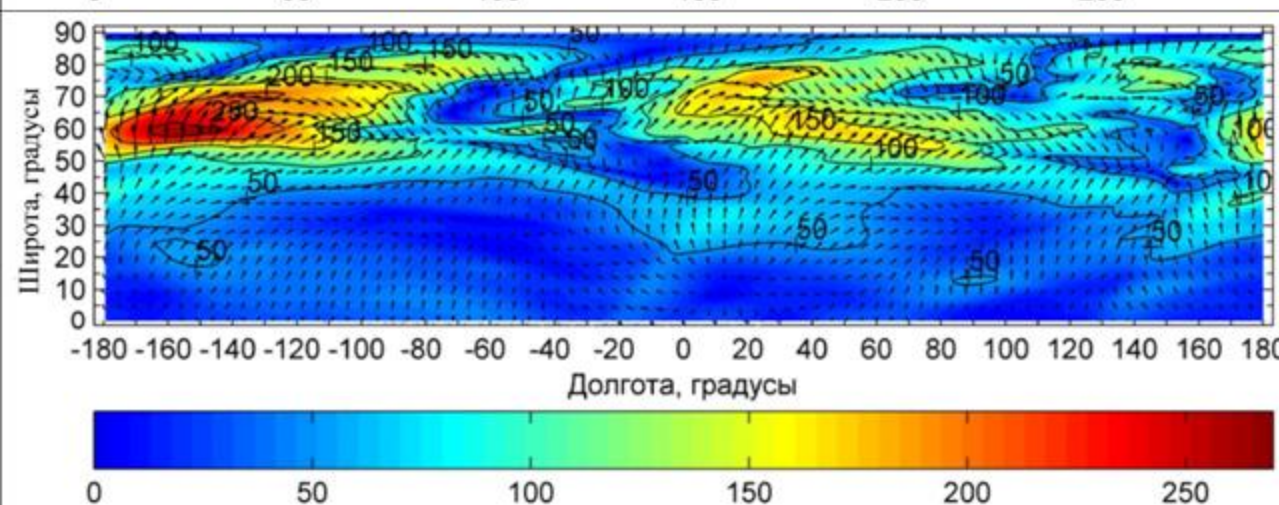
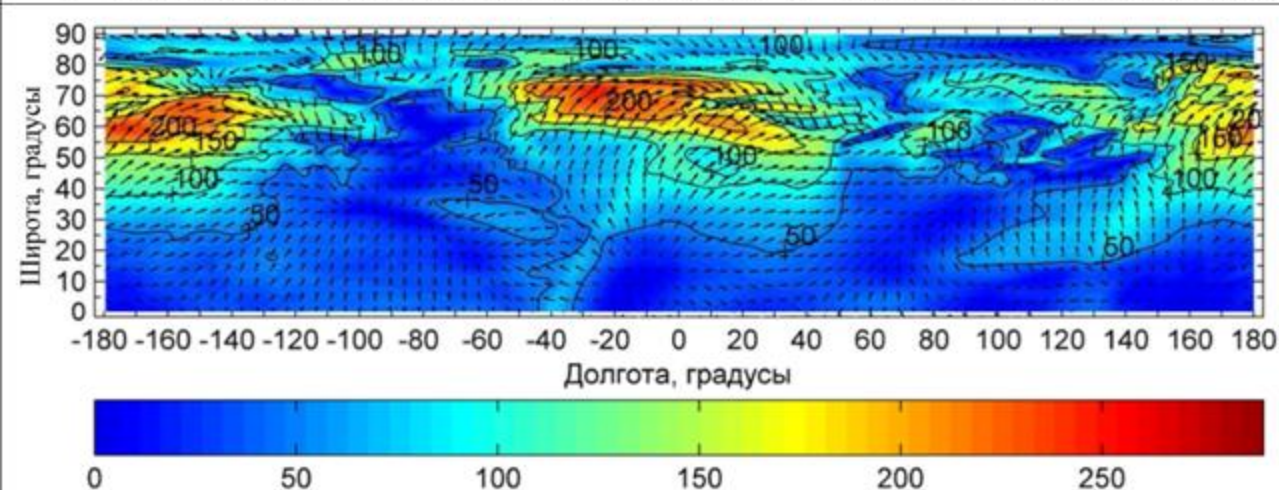
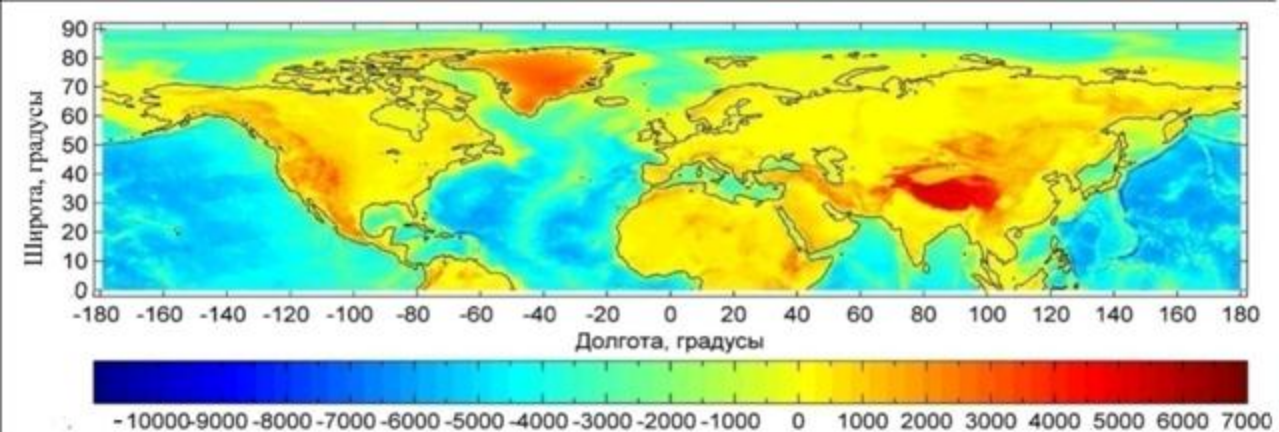
Используемый в модели рельеф Земли (вверху), а также рассчитанные горизонтальные составляющие скорости нейтрального ветра на высоте 20 км, полученные с учетом рельефа (посередине) и в приближении гладкой земной поверхности (внизу).

Стрелки указывают направление, а их длина и цвет фона — величину скорости ветра в м/с.



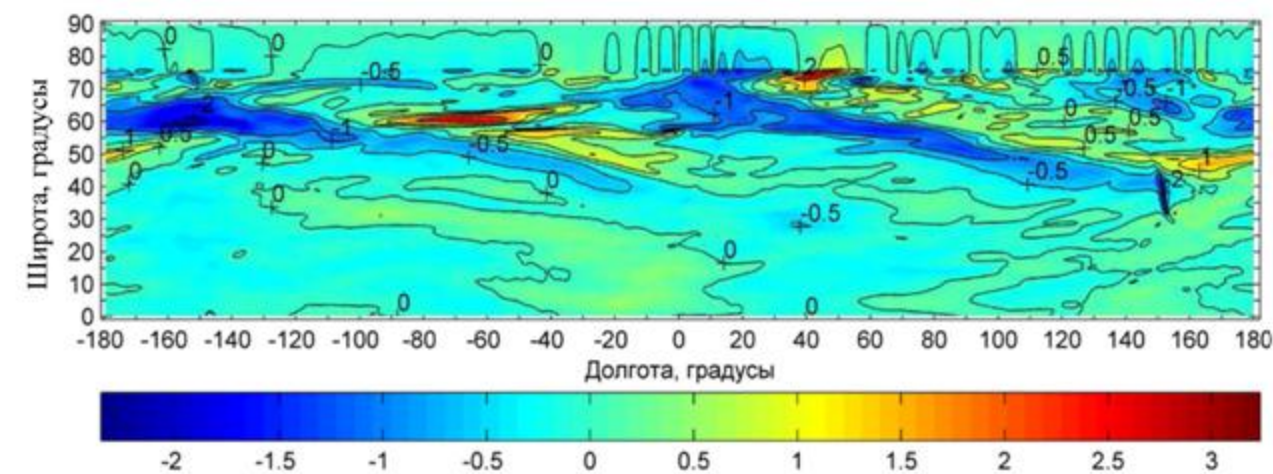
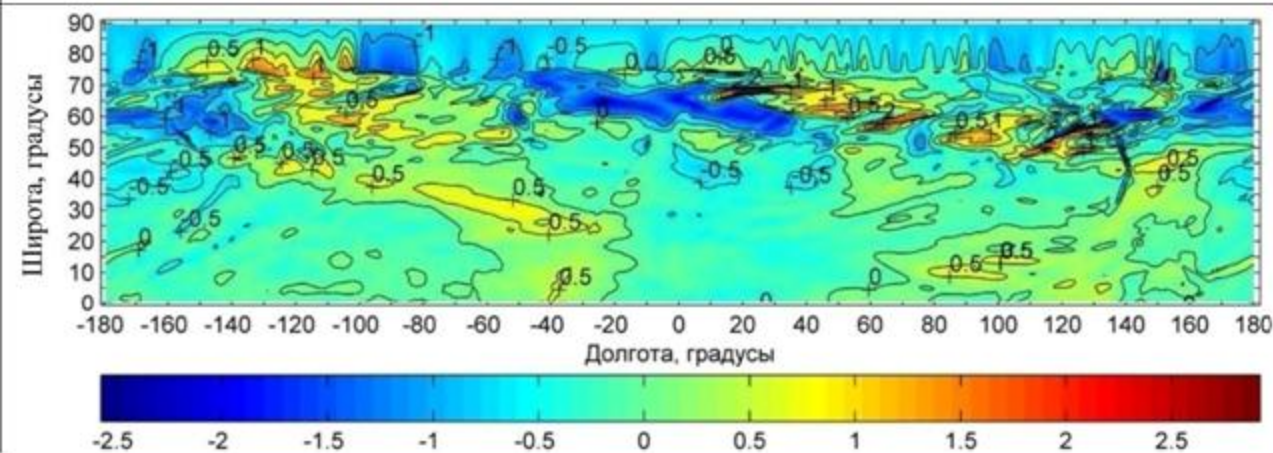
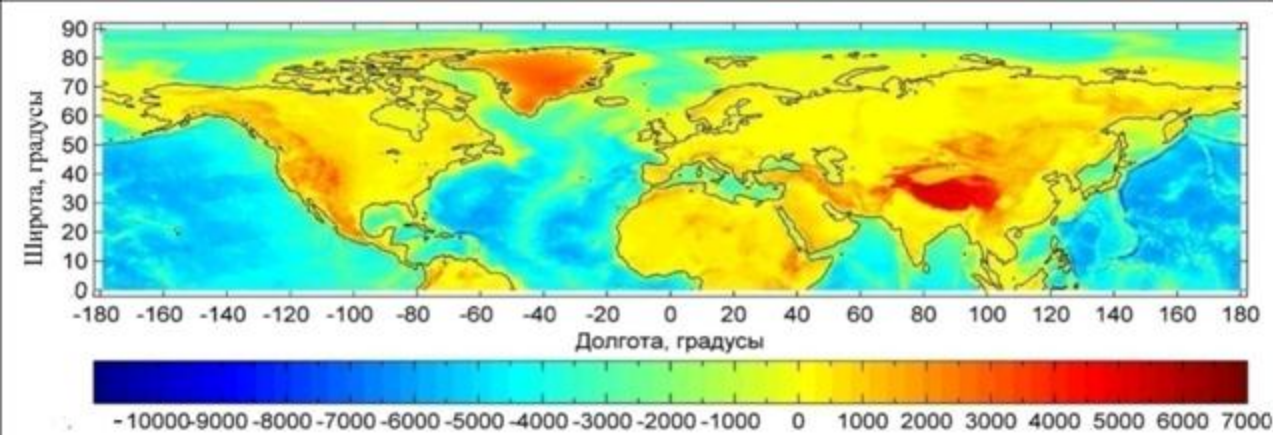
Используемый в модели рельеф Земли (вверху), а также рассчитанные вертикальные составляющие скорости нейтрального ветра на высоте 20 км, полученные с учетом рельефа (посередине) и в приближении гладкой земной поверхности (внизу).

Цвет указывает величину скорости в м/с, причем положительной считается направленная вверх скорость.



Используемый в модели рельеф Земли (вверху), а также рассчитанные горизонтальные составляющие скорости нейтрального ветра на высоте 60 км, полученные с учетом рельефа (посередине) и в приближении гладкой земной поверхности (внизу).

Стрелки указывают направление, а их длина и цвет фона — величину скорости ветра в м/с.



Используемый в модели рельеф Земли (вверху), а также рассчитанные вертикальные составляющие скорости нейтрального ветра на высоте 60 км, полученные с учетом рельефа (посередине) и в приближении гладкой земной поверхности (внизу).

Цвет указывает величину скорости в м/с, причем положительной считается направленная вверх скорость.

Горизонтальная скорость ветра может иметь сильно отличающиеся направления в точках, отстоящих друг от друга на не очень большие расстояния.

Вертикальная скорость атмосферного газа может иметь противоположные направления в имеющих различную форму горизонтальных областях.

В высоких широтах на уровнях стратосферы горизонтальная скорость атмосферного газа имеет преимущественное направление на восток. Причем такое движение воздушных масс получилось в модельных расчетах, выполненных как с учетом рельефа, так и в приближении гладкой земной поверхности. Это движение воздушных масс формирует так называемый зимний циркумполярный циклон, о существовании которого в арктической атмосфере в зимний период известно из многолетних наблюдений. Тот факт, что в модельных расчетах воспроизводится зимний циркумполярный циклон, является одним из свидетельств адекватности применяемой математической модели.

В целом, результаты расчетов горизонтальной циркуляции арктической атмосферы, полученные как с учетом рельефа, так и в приближении гладкой земной поверхности, в нижней и средней атмосфере Земли оказались качественно похожими друг на друга.

Однако, между ними обнаруживаются и определенные различия.

На высотах нижней и средней атмосферы Северного полушария существуют горизонтальные области, в которых величины горизонтальной компоненты скорости воздушных масс, рассчитанные с учетом рельефа земной поверхности, имеют более высокие значения, чем эти величины, рассчитанные в приближении гладкой земной поверхности. Различия в величинах горизонтальных скоростей в этих областях могут достигать нескольких десятков и даже ста метров в секунду. Оказывается, что некоторые из этих областей находятся непосредственно над горными массивами, в частности, над покрытой горами Гренландией, наивысшая вершина которой имеет высоту 3694 м.

Можно заметить, что различия в величинах горизонтальных скоростей в этих областях возрастают с повышением их высоты. Например, над некоторыми районами Гренландии на высоте 20 км эти различия составляют порядка 10 м/с, а на высоте 60 км эти различия превышают 100 м/с.

Если обратиться к рассмотрению различий рассчитанных вертикальных составляющих скорости атмосферного газа, то можно обнаружить, что они также возрастают с повышением высоты.

Например, на высоте 60 км на арктических широтах, превышающих примерно 70° , различия в величинах вертикальных скоростей, рассчитанных с учетом и без учета рельефа земной поверхности, могут превышать 1 м/с в некоторых зонах, а их направления могут быть противоположными. При этом на высоте 20 км их различия не превышают 15 см/с на арктических широтах, превышающих примерно 70° .

Тот факт, что в атмосфере существуют горизонтальные области, в частности располагающиеся над горными массивами, в которых различия в величинах горизонтальной и вертикальной компонент скорости воздушных масс, рассчитанных с учетом и без учета рельефа земной поверхности, возрастают с повышением высоты, кажется удивительным, поскольку при этом увеличивается расстояние от самих гор, являющихся причиной этих различий.

Объяснение этого удивительного факта заключается в следующем.

Горизонтальные потоки воздуха, набегающие на горные массивы, порождают возмущения в виде вертикальных потоков над горами. Поскольку плотность атмосферы убывает с высотой экспоненциально, то эти возмущения увеличиваются по амплитуде с возрастанием высоты. Поэтому полученные в модельных расчетах различия в величинах вертикальных скоростей, рассчитанных с учетом и без учета рельефа земной поверхности, оказались возрастающими с повышением высоты.

А поскольку вертикальные скорости существенно влияют на пространственные распределения горизонтальных скоростей, то и последние из упомянутых распределения претерпевают изменения, увеличивающиеся с высотой.

Благодаря именно вертикальным движениям атмосферного газа, осуществляется влияние рельефа земной поверхности на глобальную циркуляцию средней атмосферы.

Таким образом, результаты моделирования показали, что рельеф планеты должен оказывать заметное влияние на глобальные распределения скорости нейтрального ветра в земной атмосфере в январских условиях не только в примыкающей к земной поверхности тропосфере, но и на вышележащих уровнях средней атмосферы Земли.

Можно отметить, что установление факта заметного влияния рельефа планеты на систему ветров в земной арктической атмосфере и физическое объяснение механизма, посредством которого это влияние осуществляется, оказалось возможным благодаря тому, что примененная математическая модель циркуляции атмосферы является негидростатической, что позволяет получать с ее помощью результаты, недостижимые для аналогичных гидростатических моделей.