

## Механизм образования полярных циклонов и возможность их прогноза

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

*Полярный геофизический институт Кольского научного центра РАН,  
184209, Мурманская обл., г. Апатиты, ул. Академгородок, 26а  
E-mail: mingalev\_i@pgia.ru*

В данной работе при помощи численного моделирования исследуется механизм формирования полярных циклонов в районе нахождения арктического фронта в зимней тропосфере северного полушария. Моделирование проводится в рамках полной системы уравнений газовой динамики с учетом переноса инфракрасного излучения, фазовых переходов водяного пара в микро капли воды и частицы льда и с учетом оседания этих капель и частиц льда в поле силы тяжести. В начальных и граничных условиях модели используются наблюдательные данные о структуре доминирующих воздушных потоков в районе арктического фронта над Норвежским морем в январе. Численно получено формирование крупномасштабных циклонических вихревых течений за 15–20 часов при наличии искривленного участка арктического фронта длиной 500–600 км, отклоняющегося от остальной части фронта на север или на юг на 100 км или более. На основании результатов моделирования предлагается методика краткосрочного прогноза образования и движения полярных циклонов. Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 10–01–00451.

**Ключевые слова:** циркуляция атмосферы, полярный циклон, численное моделирование.

### Введение

В северном полушарии полярные циклоны наблюдаются севернее широты 60 градусов в период с декабря по февраль. Как правило, период их формирования составляет 15–25 часов, а время их существования не превышает трех суток. В частности, полярные циклоны достаточно регулярно возникают над незамерзающей поверхностью Норвежского и Баренцева морей. В январе в северном полушарии обычно наблюдаются две значительные ветви арктического фронта, или, иначе говоря, два арктических фронта один – на севере Атлантического океана и на севере Евразии, другой – на севере Северной Америки и над Канадским Арктическим архипелагом. Области к северу от арктических фронтов заняты арктическим воздухом. Здесь в диапазоне высот от 0 до 2–2,5 км меридиональная компонента ветра направлена на юг, а зональная компонента направлена с востока на запад и увеличивается по мере приближения к фронту до значений 10–15 м/с. Области к югу от арктических фронтов заняты полярным воздухом (воздухом умеренных широт). Здесь в диапазоне высот от 0 до 2–2,5 км меридиональная компонента ветра направлена на север, а зональная компонента направлена с запада на восток и увеличивается по мере приближения к фронту до значений 10–15 м/с. В этом фронте и в его ближайших окрестностях вертикальная компонента ветра направлена вверх. Арктический фронт является границей между циркуляционной ячейкой Ферреля и приполюсной циркуляционной ячейкой. Он представляет собой область, где зональная компонента ветра быстро меняется (имеется сдвиговое горизонтальное течение). Как правило, протяженность арктического фронта в меридиональном направлении не превышает 200 км, а протяженность его в зональном направлении составляет более 2000 км. Направление, вдоль которого проходит арктический фронт, отклоняется от зонального как правило не более чем на 20 градусов.

В настоящей работе излагаются результаты численного моделирования динамики тропосферы в районе арктического фронта над Норвежским морем для условий января при наличии искривленного участка этого фронта в начальный момент. Длина искривленного участка составляла 500–600 км, а его максимальное отклонение на север или на юг составляло 100–150 км. Для численного моделирования использована созданная авторами 3–мерная региональная модель циркуляции атмосферы. Варианты этой модели с меньшими размерами по горизонту использовались в работах (Белоцерковский, Мингалев и др., 2006), (Белоцерковский, Мингалев и др., 2009).

### Описание модели

В модели учитываются процессы нагрева–охлаждения воздуха за счет поглощения–испускания инфракрасного излучения, а также за счет фазовых переходов водяного пара в микрокапли воды и частицы льда, которые играют важную роль. Также учитывается оседание микрокапель воды и частиц льда в поле силы тяжести. Атмосферный газ рассматривается как смесь воздуха и водяного пара, в которой могут присутствовать аэрозоли двух видов: первый состоит из микрокапель воды, а второй – из микрочастиц льда. Считаем микрокапли воды и микрочастицы льда сферами радиусов 0,1 мм и 0,03 мм, соответственно, движущимися относительно смеси воздуха и пара воды со скоростями осаждения, определяемыми по формуле Стокса с поправкой Каннигэма. Выбранные размеры частиц аэрозолей соответствуют реальным средним размерам частиц в облаках. Температуру смеси и частиц аэрозолей считаем одинаковой. Считаем, что аэрозоль из капель воды может присутствовать только при условиях насыщенности водяного пара и температуре не менее 273,15 К, а аэрозоль из частиц льда может присутствовать только при условиях насыщенности водяного пара и температуре не более 273,15 К. При температуре 273,15 К температура среды не может увеличиться, пока не расплавятся все частицы льда, и не может уменьшиться, пока не замерзнут все капли воды. Система уравнений и метод численного решения детально описаны в работах (Белоцерковский, Мингалев и др., 2006, 2009), (Мингалев и др., 2010). В каждом узле расчетной сетки вычисляются температура, плотность воздуха и водяного пара, гидродинамическая скорость смеси, а также массы в единице объема водяных капель и микрочастиц льда. В систему уравнений модели входят уравнения неразрывности для воздуха и для полного содержания воды во всех фазовых состояниях, уравнение для 3-мерного вектора объемной плотности импульса воздуха и уравнение для объемной плотности полной энергии, которая определяется с учетом скрытой теплоты фазовых переходов водяного пара. Все уравнения используются в консервативной форме. Область моделирования в настоящей работе является частью шарового слоя над ограниченным участком земной поверхности и имеет размеры: от поверхности Земли до высоты 15 км, 36° по долготе и 25° по широте. Южная граница области моделирования находилась на 55° с.ш. Расчетная сетка выбрана равномерной с шагом по широте и долготе, равным 0,04°, и с шагом по высоте – 200 м.

**Граничные условия.** На нижней границе области моделирования заданы: условие прилипания, условие постоянной влажности воздуха, а также задан поток тепла, пропорциональный разности температур воздуха и поверхности воды, и задан восходящий поток теплового излучения, пропорциональный 4–й степени температуры поверхности. Температура поверхности океана считалась зависящей только от широты, причем линейно убывала от значения 3°С на южной границе до значения 0°С на северной границе. На верхней грани-

це области моделирования заданы: нисходящий поток теплового излучения, нулевая вертикальная компонента скорости, нулевые значения производных по высоте от вертикальной компоненты вектора потока тепла и от горизонтальных компонент скорости (проскальзывание). На северной и южной вертикальных границах области моделирования вертикальная и зональная компоненты скорости ветра считаются заданными. Вертикальная компонента полагается равной нулю, а зональная компонента полагается равной -3 м/с (направлена с востока на запад) на северной границе, и полагается равной 3 м/с (направлена с запада на восток) на южной границе. На высотах ниже 2,5 км меридиональная компонента задана и направлена внутрь области моделирования, на высоте 2,5 км эта компонента равна нулю, выше 2,5 км задана равной нулю 1-ая производная от этой компоненты в меридиональном направлении. Температура воздуха на этих границах также считается заданной.

В тех точках границы, где воздух втекает в область моделирования, его плотность считается заданной, а в тех точках границы, где воздух вытекает из области моделирования, его плотность рассчитывается с использованием условия равенства нулю 1-ой производной плотности вдоль нормали через границу. На восточной вертикальной границе области моделирования севернее центральной линии фронта и на западной вертикальной границе южнее этой линии заданы постоянные по времени значения всех компонент скорости ветра, температуры, плотности воздуха и содержание в нем водяного пара, а также нулевое содержание микрокапель воды и частиц льда. На восточной вертикальной границе южнее центральной линии фронта и на западной вертикальной границе севернее этой линии задаются нулевые значения производной вдоль нормали к границе от всех переменных. Заданные распределения компонент скорости ветра моделируют течение в районе арктического фронта. Зональная компонента ветра на восточной границе к северу от фронта направлена на запад и увеличивается при приближении к фронту, достигая максимальной величины вблизи его северной границы. К югу от фронта на западной границе зональная компонента ветра направлена на восток и также увеличивается при приближении к фронту, достигая максимальной величины вблизи южной границы фронта. Сам фронт представляет собой зональное сдвиговое течение, в котором зональная скорость линейно зависит от широты. Его протяженность в меридиональном направлении составляла от 200 до 300 км. Центральная линия этого сдвигового течения находилась на широтах от 67 до 69 градусов. Меридиональная компонента на восточной границе к северу от фронта и на западной границе к югу от фронта направлена к центру арктического фронта на высотах менее 2,5 км и от центра фронта на высотах более 2,5 км. На этих участках границы плотность воздуха удовлетворяет условию гидростатического равновесия, а вертикальная компонента ветра определяется из уравнения неразрывности. Вне фронта эта компонента равна нулю, а над фронтом направлена вверх, достигая максимальных значений над центром фронта.

**Начальные условия.** Начальные распределения компонент скорости ветра моделируют движение воздушных масс в районе арктического фронта и севернее центральной линии фронта задаются как на восточной границе, а южнее этой линии задаются как на западной границе, являясь продолжением граничных условий внутрь области моделирования. Причем в точках равноудаленных от центральной линии фронта к северу и к югу зональная компонента ветра имеет одинаковые абсолютные величины и противоположные направления. При этом арктический фронт задавался с изгибами в меридиональном направлении, размер и форма которых соответствовали имеющимся данным наблюдений. Содержание водяных капель и микрочастиц льда в воздухе в начальный момент мы полагали равным нулю во всей области моделирования. Начальная температура задавалась горизонтально однородной, а ее

зависимость от высоты определялись по эмпирической модели NRLMSISE-00 (Picone et al., 2002) для центра расчетной области. Начальная плотность воздуха и начальная плотность водяного пара также задавались горизонтально однородными. Значение начальной плотности воздуха на поверхности определялось по эмпирической модели NRLMSISE-00 для центра области моделирования. Зависимость начальной плотности водяного пара от высоты определялась из условия насыщенности водяного пара. Зависимость начальной плотности воздуха от высоты определялась из условия гидростатического равновесия.

## Результаты моделирования

Авторами было проведено численное моделирование эволюции течения при разных изгибах арктического фронта в начальный момент. Форма и размеры изгибов выбирались соответствующими данным спутниковых наблюдений зимней тропосферы северного полушария. Результаты проведенных расчетов показали, что если имеется изогнутый на север или на юг участок арктического фронта длиной 500–600 км с максимальным отклонением в меридиональном направлении 100 км или более, то в течение 15–25 часов формируется циклоническое течение с горизонтальными размерами 600–700 км. Максимальная скорость ветра в этом течении может на 3–5 м/с превышать максимальную скорость ветра на границе арктического фронта в начальный момент.

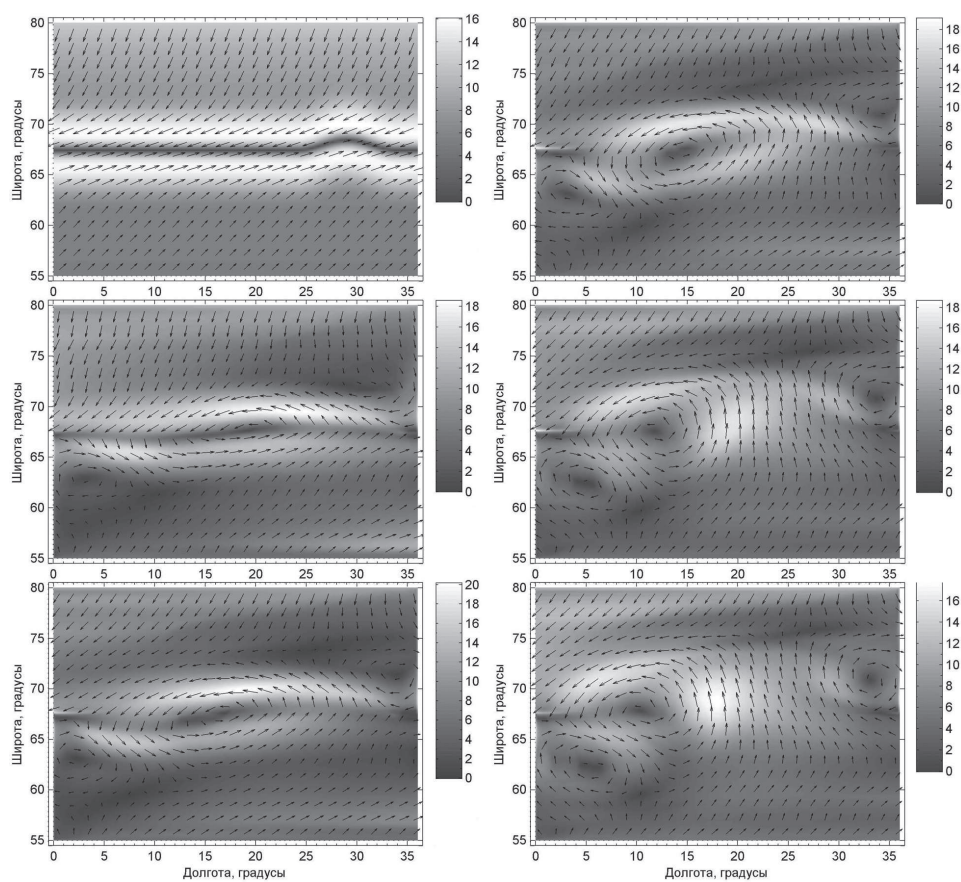


Рис. 1. Распределение горизонтальной составляющей ветра в (м/с) на высоте 600 м в начальный момент (слева сверху) и в моменты времени через 10 часов (слева в середине), через 15 часов (слева внизу), через 30 часов (справа сверху), через 30 часов (справа в середине) и через 35 часов (справа внизу) после начала моделирования для случая, когда в начальный момент арктический фронт имеет искривленный участок, отклоняющийся на север от остальной части фронта

Результаты моделирования для случая, когда в начальный момент арктический фронт имеет искривленный участок длиной 500 км, отклоняющийся на север относительно остальной части фронта на 100 км, представлены на рис.1. Слева в верхней части рис.1 изображено распределение горизонтальной составляющей ветра на высоте 600 м в начальный момент. Слева в середине и слева внизу изображено это же распределение в моменты времени через 10 и 15 часов после начала моделирования, соответственно. Справа на рис. 1 изображено это же распределение в моменты времени через 20 часов –вверху, через 30 часов – в середине и через 35 часов – внизу. Стрелки указывают направление, а цвет указывает абсолютную величину горизонтальной составляющей ветра. Арктический фронт в начальный момент слева на верхней части рис. 1 представляет собой темную полосу между двух светлых полос, в которых находятся наиболее длинные стрелки, и, где скорость ветра достигает 16 м/с. Центр изогнутого участка фронта находится на 29 град. к востоку от западной границы области моделирования. Слева на средней части рис.1 видно, что через 10 часов после начала моделирования циклонический вихрь окончательно еще не сформировался, но хорошо заметно разрушение арктического фронта к востоку и к западу от центра формирующегося вихря, который лежит на широте примерно 67,5 град. с.ш. и примерно на 20 град. к востоку от западной границы области моделирования. Слева на нижней части рис.1 видно, что через 15 часов после начала моделирования хорошо виден сформировавшийся циклонический вихрь с центром, лежащим на широте примерно 67 град. с.ш. и примерно на 17 град. к востоку от западной границы области моделирования. Видно, что скорость ветра в этом вихре достигает 20 м/с в северной его части, а горизонтальный поперечный размер этого вихря составляет примерно 600–800 км. Справа на верхней части рис.1 видно, что через 20 часов после начала моделирования центр циклонического вихря лежит на широте примерно 67 град. с.ш. и примерно на 15 град. к востоку от западной границы области моделирования, то есть переместился за 10 часов примерно на 100 км на запад. При этом скорость ветра в вихре достигает 19 м/с. Справа на средней части рис.1 видно, что через 30 часов после начала моделирования центр циклонического вихря лежит на широте примерно 67 град. с.ш. и примерно на 12 град. к востоку от западной границы области моделирования, то есть переместился за 10 часов примерно на 150 км на запад. При этом скорость ветра в вихре достигает 18,5 м/с. Справа на нижней части рис.1 видно, что через 35 часов после начала моделирования центр циклонического вихря лежит на широте примерно 67 град. с.ш. и примерно на 10,5 град. к востоку от западной границы области моделирования, то есть переместился за 5 часов примерно на 75 км на запад. При этом скорость ветра в вихре достигает 17,5 м/с. Таким образом из представленных на рис.1 результатов моделирования видно, что при наличии в начальный момент изогнутого на север участка арктического фронта к западу от этого участка примерно за 15 часов формируется циклонический вихрь, который перемещается на запад со скоростью 10–15 км/ч. Максимальная скорость ветра в вихре достигается во временном интервале 15–20 часов после начала моделирования, а затем начинает медленно уменьшаться.

Результаты моделирования для случая, когда в начальный момент арктический фронт имеет изогнутый на юг участок длиной 500 км с величиной максимального отклонения в меридиональном направлении 100 км представлены на рис. 2. Слева в верхней части рис. 2 изображено распределение горизонтальной составляющей ветра на высоте 600 м в начальный момент. Слева в середине и слева внизу изображено это же распределение в моменты времени через 10 и 15 часов после начала моделирования, соответственно. Справа вверху изображено это же распределение в момент времени через 20 часов после начала моделирования, справа в середине через 30 часов, а справа внизу через 40 часов. Слева на верхней части рис.2 видно, что в начальный момент центр изогнутого участка фронта находится на 7 град. к востоку от западной границы об-

ласти моделирования. Слева на средней части рис.2 видно, что через 10 часов после начала моделирования произошло разрушение арктического фронта на месте изгиба и происходит формирование циклонического вихря. Слева на нижней части рис. 2 видно, что через 15 часов после начала моделирования почти сформировался циклонический вихрь с центром, лежащим на широте примерно 67 град. с.ш. и примерно на 18 град. к востоку от западной границы области моделирования. Видно, что скорость ветра в этом вихре достигает 17,5 м/с в северной и в западной его частях. Справа на верхней части рис.2 видно, что через 20 часов после начала моделирования сформировался циклонический вихрь с центром, лежащим на широте примерно 66 град. с.ш. и примерно на 16 град. к востоку от западной границы области моделирования. При этом скорость ветра в вихре достигает 17,5 м/с, а горизонтальный поперечный размер этого вихря составляет примерно 600–800 км. Справа на средней части рис.2 видно, что через 30 часов после начала моделирования центр циклонического вихря лежит на широте примерно 65 град. с.ш. и примерно на 15,5 град. к востоку от западной границы области моделирования, то есть переместился за 10 часов примерно на 25 км на запад и примерно на 100 км на юг. При этом скорость ветра в вихре достигает 16,5 м/с. Справа на нижней части рис.2 видно, что через 40 часов после начала моделирования центр циклонического вихря лежит на широте примерно 64 град. с.ш. и примерно на 15,5 град. к востоку от западной границы области моделирования, то есть переместился за 10 часов примерно на 100 км на юг. При этом скорость ветра в вихре достигает 14,5 м/с. Из представленных на рис.2 результатов моделирования видно, что при наличии в начальный момент изогнутого на юг участка арктического фронта к востоку от этого участка примерно за 20 часов формируется циклонический вихрь, который перемещается на юг со скоростью примерно 10 км/ч. Максимальная скорость ветра в вихре достигается примерно через 20 часов после начала моделирования, а затем начинает медленно уменьшаться.

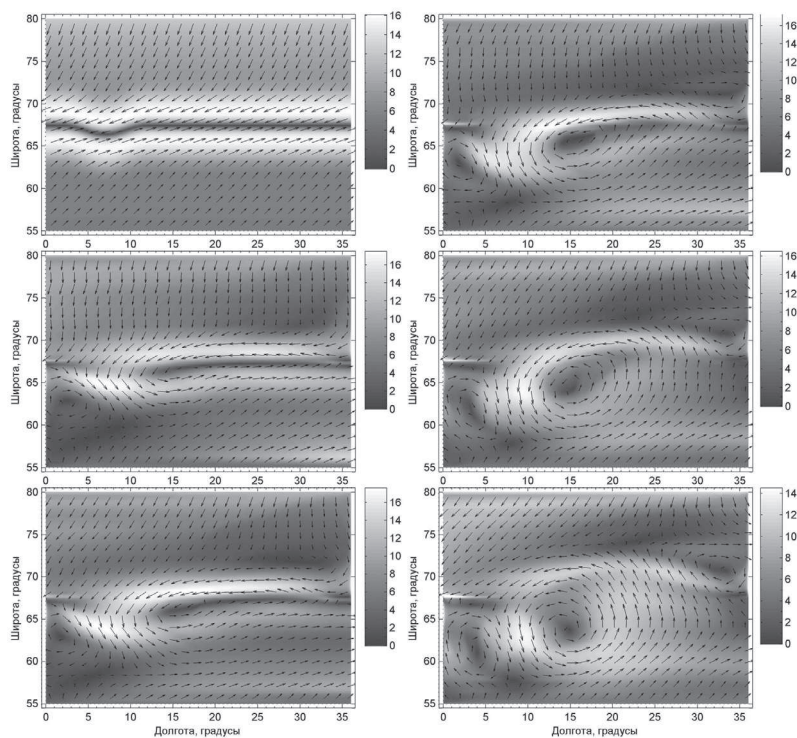


Рис.2. Распределение горизонтальной составляющей ветра (м/с) на высоте 600 м в начальный момент (слева сверху) и моменты времени через 10 часов (слева в середине), через 15 часов (слева внизу), через 20 часов (справа сверху), через 30 часов (справа в середине) и через 40 часов (справа внизу) после начала моделирования для случая, когда в начальный момент арктический фронт имеет искривленный участок, отклоняющийся на юг от остальной части фронта

Также авторами было проведено моделирование для случаев, когда в начальный момент величина максимального отклонения в меридиональном направлении изогнутого участка арктического фронта составляла 150 и 200 км. Для этих случаев получились результаты полностью аналогичные изложенным выше, причем, скорость формирования циклонического вихря увеличивалась при увеличении максимального отклонения в меридиональном направлении изогнутого участка фронта.

### Заключение

Результаты численного моделирования показали, что если начальные и граничные условия достаточно точно соответствуют горизонтальным и вертикальным движениям воздуха в окрестности арктического фронта, то циклонические течения формируются при возникновении искривленных участков этого фронта. Если возникает отклоняющийся на север искривленный участок фронта длиной 500–600 км с величиной максимального отклонения в меридиональном направлении 100 км или более, то в течение 15 часов к западу от него формируется циклоническое горизонтальное вихревое течение. Если возникает отклоняющийся на юг участок фронта длиной 500–600 км с величиной максимального отклонения в меридиональном направлении 100 км или более, то в течение 20 часов к востоку от него формируется циклоническое горизонтальное вихревое течение. Горизонтальные размеры этих течений 600 км или более, а скорость ветра в них достигает значений 15–20 м/с. Время формирования циклонического течения сокращается при увеличении максимального отклонения в изгибе.

Главной физической причиной формирования крупномасштабного циклонического вихря является разрушение арктического фронта в результате развития неустойчивости после возникновения искривленного участка этого фронта. При этом кинетическая энергия крупномасштабного сдвигового течения переходит в кинетическую энергию циклонического вихря. Таким образом, изгибы арктического фронта являются предвестниками образования полярных циклонов. Обнаружение таких изгибов арктического фронта при помощи спутниковых наблюдений является сигналом, что высока вероятность образования в течение 15–20 часов полярного циклона. При этом по направлению изгиба (на север или на юг) можно предсказать район возникновения полярного циклона.

### Литература

1. Белоцерковский О.М., Мингалев И.В., Мингалев В.С., Мингалев О.В., Опарин А.М. (2006) О механизме возникновения крупномасштабного вихря в тропосфере над неравномерно нагретой поверхностью // ДАН, 2006. Т. 410. № 6. С. 816–820.
2. Белоцерковский О.М., Мингалев И.В., Мингалев В.С., Мингалев О.В., Опарин А.М., Четкин В.М. (2009) Образование крупномасштабных вихрей в сдвиговых течениях в нижней атмосфере Земли в области тропических широт // Космические исследования, 2009, Т. 47. № 6. С. 501–514.
3. Мингалев И.В., Астафьева Н.М., Орлов К.Г., Мингалев В.С., Мингалев О.В. (2010) Механизм возникновения циклонических возмущений в области ВЗК и их раннее обнаружение // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2010. Т. 7. № 1. С. 112–125.
4. Picone J.M., Hedin A.E., Drob D.P., and Aikin A.C. (2002) NRLMSISE-00 empirical model of the atmosphere: Statistical comparisons and scientific issues // J. Geophys. Res., 2002. V. 107. No. A12. P. 1468–1483.

# The mechanism of formation of polar cyclones and possibility their predictions by using satellite observation data

I.V. Mingalev, K.G. Orlov, V.S. Mingalev

*Polar Geophysical Institute of RAS, (PGI RAS),  
184209 Murmansk region, Apatity, Academgorodok 26a,  
E-mail:mingalev\_i@pgia.ru*

The mechanism of formation of polar cyclones in the field of the Arctic front in a winter troposphere of the northern hemisphere is investigated by means of numerical modeling. Used model is based on numerical solving of full gas dynamic equations. Heating/cooling of the air due to absorption/emission of infrared radiation, as well as due to phase transitions of water vapor to microdrops of water and ice particles and sedimentation of these drops and ice particles in the field of gravity are taken into account. Initial and boundary conditions correspond to the observation data about structure of dominating airflows around the Arctic front over Norwegian sea during January. The modelling results showed that if at the initial moment there is a curved site of the Arctic front with the length of 500-600 km, which deviate to the north or to the south from remaining part of front, then large-scale cyclonic vortex is generated for 15-20 hours. On the base of modelling results the method of the short-term prognosis of formation and travel of polar cyclones is suggested. This work was partly supported by the RFBR grant № 10-01-00451.

**Keywords:** atmosphere circulation, polar cyclones, numerical modelling.