

УДК 551.513:551.515.2

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЗАРОЖДЕНИЯ ПОЛЯРНЫХ ЦИКЛОНОВ В ВЫСОКОШИРОТНОЙ АТМОСФЕРЕ

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

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

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

*E-mail: mingalev@pgia.ru

Поступила в редакцию 15.10.2021 г.

После доработки 05.11.2021 г.

Принята к публикации 22.11.2021 г.

Представлены результаты численных расчетов, направленных на моделирование нестационарного процесса формирования полярных циклонов на начальной стадии в тропосфере в окрестности арктического фронта. Установлено, что возникновение выпуклостей в очертаниях арктического фронта может привести к зарождению обладающих различающимися свойствами полярных циклонов в высокоширотной атмосфере.

DOI: 10.31857/S0367676522030176

ВВЕДЕНИЕ

Самый нижний слой земной атмосферы, называемый тропосферой, является весьма неоднородным в горизонтальных направлениях. Это относится не только к глобальному распределению температуры, но также к глобальной ветровой системе. В тропосфере часто наблюдаются крупномасштабные вихревые течения воздушных масс (циклоны и антициклоны). В частности, в высокоширотных областях атмосферы регулярно наблюдаются так называемые полярные циклоны, внутри которых атмосферное давление существенно понижено, а скорость ветра значительно повышена. Наиболее интенсивные полярные циклоны называют арктическими ураганами. Исследованию физических характеристик, структуры и особенностей поведения полярных циклонов и арктических ураганов экспериментальными методами посвящена специальная научная литература, в частности, работы [1–9]. Чаше всего полярные циклоны и арктические ураганы возникают в осенне-зимний период над незамерзающими поверхностями Норвежского и Баренцева морей. Они могут смещаться на значительные расстояния за время своего существования. Полярные циклоны и арктические ураганы создают штормы в северных морях, могут приводить к затоплению прибрежных территорий в Арктической зоне, могут вызывать обледенение самолетов и кораблей, в частности тех, которые проходят по Северному морскому пути, могут выводить из строя про-

мышленные и транспортные системы на море и на суше, они обладают большой разрушительной силой.

Поэтому важными научными и практически задачами являются предсказание зарождения полярных циклонов, прогнозирование траекторий их движения, оценка изменений их характеристик за времена их существования. К сожалению, имеющиеся в настоящее время экспериментальные средства не позволяют измерять детальные трехмерные распределения полей термодинамических и газодинамических параметров в нижней атмосфере с точностью, необходимой для решения перечисленных задач. Кроме того, экспериментальное решение перечисленных задач наземными методами весьма затруднено суровыми климатическими условиями, наличием океана и малой населенностью Арктической зоны. Поэтому физическая теория предсказания зарождения полярных циклонов все еще далека до завершения, несмотря на проведение теоретических работ в этом направлении [10–17].

Однако для решения перечисленных выше задач может быть применен метод математического моделирования, который в последнее время находит все большее применение в исследованиях физических процессов, протекающих в земной атмосфере и околоземном космическом пространстве. Для исследования особенностей поведения полярных циклонов метод математическо-

го моделирования применялся, в частности, в работах [18–23].

Для решения перечисленных выше задач может быть применена, в частности, региональная математическая модель ветровой системы нижней атмосферы, разработанная не так давно в Полярном геофизическом институте [24–26], которая ранее уже применялась для моделирования процессов зарождения как тропических крупномасштабных вихрей [24, 25, 27–32], так и полярных циклонов [26, 33–38]. В настоящей работе приводится обзор результатов, полученных при помощи этой региональной математической модели и направленных на исследование начальной стадии зарождения и формирования полярных циклонов в высокоширотной атмосфере. Обозреваемые результаты ранее были представлены в серии работ, которые были опубликованы в разрозненных научных изданиях, здесь же дается их общий обзор и обсуждение.

КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Математическая модель ветровой системы нижней атмосферы, применяемая в настоящей работе, является региональной. В ней областью расчетов является часть шарового слоя над ограниченным участком земной поверхности, которая по высоте имеет размеры от поверхности Земли до высоты 15 км, по долготе — 36 град, а по широте — 25 град. Модель основана на численном решении методом конечных разностей системы уравнений переноса для смеси воздуха и водяного пара, в которой могут присутствовать аэрозоли двух видов (микрокапли воды и микрочастицы льда). В систему решаемых уравнений входят уравнения неразрывности и движения для горизонтальных и вертикальной компонент скорости вязкого сжимаемого газа, а также уравнение теплового баланса, в котором учитываются процессы нагрева—охлаждения воздуха как за счет поглощения и испускания инфракрасного излучения, так и за счет фазовых переходов водяного пара в микроскопические капли воды и частицы льда. В применяемой модели вертикальная скорость газа находится не из условия гидростатического равновесия, как в большинстве подобных моделей, а путем численного решения полного уравнения движения для вертикальной компоненты скорости без пренебрежения какими-либо членами, т.е. модель является негидростатической.

Применяемая математическая модель позволяет рассчитывать зависящие от времени пространственно трехмерные распределения плотности воздуха, водяного пара, микрокапель воды и частиц льда, зональной, меридиональной и вертикальной компонент скорости смеси воздуха и водяного пара, а также температуры атмосфер-

ного газа в области моделирования на отрезках времени порядка суток и более. В модели используются географические координаты, и для численного решения моделирующих уравнений применяется метод конечных разностей, при этом шаги расчетной сетки по высоте равны 200 м, а по широте и долготе шаги сетки одинаковы и равны 0.04 град. Подробное описание применяемой математической модели и используемых в ней уравнений можно найти в работах [24–26].

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАРОЖДЕНИЯ ПОЛЯРНЫХ ЦИКЛОНОВ

Поведение высокоширотной атмосферы имеет ряд специфических особенностей, часть которых обусловлена закономерностями глобальной циркуляции земной атмосферы. Одна из таких закономерностей состоит в том, что в вертикальных направлениях циркуляция земной атмосферы в Северном полушарии не является однородной, в ней можно выделить так называемые приполюсную циркуляционную ячейку и находящуюся южнее циркуляционную ячейку Ферреля [39, 40]. Границей между этими циркуляционными ячейками является так называемый арктический фронт, который оказывается лежащим в Арктической зоне. В тропосфере горизонтальные движения воздуха севернее арктического фронта направлены преимущественно на запад, а южнее — на восток. Поэтому арктический фронт представляет собой вытянутую примерно вдоль широты длинную узкую область, где зональная компонента ветра быстро меняется в меридиональном направлении (имеется сдвиговое горизонтальное течение). Вместе с тем, арктический фронт является своеобразной границей между холодными воздушными массами, находящимися севернее арктического фронта, и более теплым атмосферным газом, находящимся южнее арктического фронта.

Из данных спутниковых наблюдений известно, что у арктических фронтов регулярно возникают искривленные участки длиной 500–1000 км, отклоняющиеся от остальной части фронта на север или на юг на 100–200 км. В силу специфики горизонтальных и вертикальных движений воздуха в области арктического фронта, в этой области возникают облачные структуры, воспроизводящие своей формой очертания самого арктического фронта. Эти облачные структуры хорошо видны с космических аппаратов, осуществляющих мониторинг земной поверхности в микроволновом и инфракрасном диапазонах. Пример спутниковых данных приведен на левой панели рис. 1, из которой видно, что облачная структура имеет выпуклость к северу, что весьма вероятно отражает конфигурацию арктического фронта в этом регионе. Облачные структуры на правой панели рис. 1, которые зафиксированы примерно

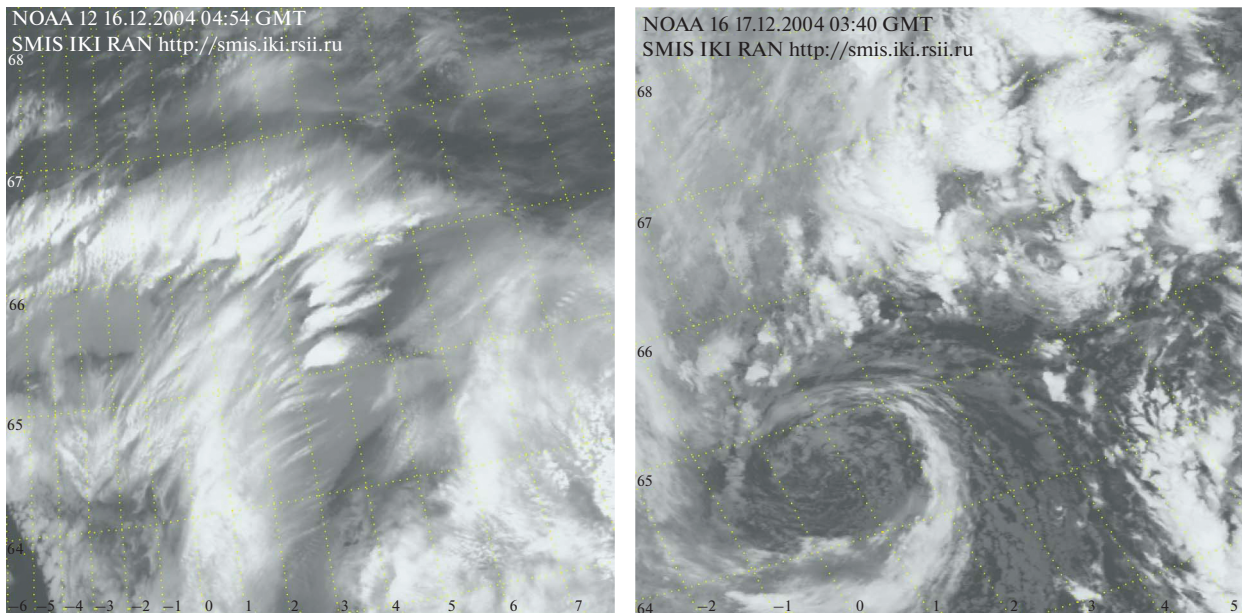


Рис. 1. Региональные карты облачности над частью Норвежского моря, полученные из радиометрических спутниковых данных в 04:54 GMT 16.12.2004 (левая панель) и в 03:40 GMT 17.12.2004 (правая панель). По горизонтальной и вертикальной осям указаны географические координаты. Снимки взяты из архива данных, составленного по измерениям спутника NOAA и созданного лабораторией информационной поддержки космического мониторинга ИКИ РАН (<http://smis.iki.rssi.ru>).

через сутки, указывают на то, что за это время произошло формирование циклонического вихря с центром, лежащим южнее и западнее первоначального местоположения искривленного участка арктического фронта.

Анализ и других данных спутниковых наблюдений, аналогичных приведенным на рис. 1, привел авторов работы к гипотезе о том, что полярный циклон может сформироваться в результате развития неустойчивости течения воздуха в районе арктического фронта при появлении возмущения в виде изогнутого (выпуклого) участка этого фронта. Результаты численного моделирования, которые будут приведены ниже в этой работе, подтверждают эту гипотезу.

При использовании описанной выше математической модели для исследования начальной стадии зарождения полярных циклонов мы помещали южную границу области моделирования на 55° северной широты так, чтобы арктический фронт пересекал эту область моделирования в ее центральной части в направлении с запада на восток. В своих расчетах мы задавали граничные и начальные условия так, чтобы они воспроизводили в области моделирования в начальный момент течения, свойственные для Арктической зоны в зимних условиях над Норвежским морем.

В обозреваемых в настоящей работе численных исследованиях в начальный момент на арктическом фронте задавались разные возмущения в виде выпуклых участков длиной 500–600 км с

отклонениями к северу или к югу не менее, чем на 100 км, и проводилось численное моделирование на временах порядка 2 сут. При этом рассматривались случаи, когда в начальный момент распределение модуля горизонтальной скорости ветра относительно центральной линии арктического фронта было как симметричным, так и несимметричным.

Рассмотрим взятые из работы [26] результаты расчетов для случая, когда в начальный момент арктический фронт имеет изогнутый участок фронта длиной 500 км с величиной максимального отклонения в северном направлении 100 км, и когда распределение модуля горизонтальной скорости ветра примерно симметрично относительно центральной линии арктического фронта; эти результаты представлены на рис. 2. На верхней панели рис. 2 видна начальная форма имеющего выпуклость арктического фронта (темная полоса, окруженная сверху и снизу светлыми полосами) в области моделирования и распределение горизонтальной составляющей ветра на высоте 600 м в начальный момент, а на нижних панелях рисунка показаны те течения, которые возникли через 20 и 40 ч после начала расчетов.

Результаты расчетов показывают, что через некоторое время после начала моделирования начинается процесс разрушения арктического фронта и формирования циклонического вихря (полярного циклона), центр которого оказывается лежащим на месте начального положения арктического фронта

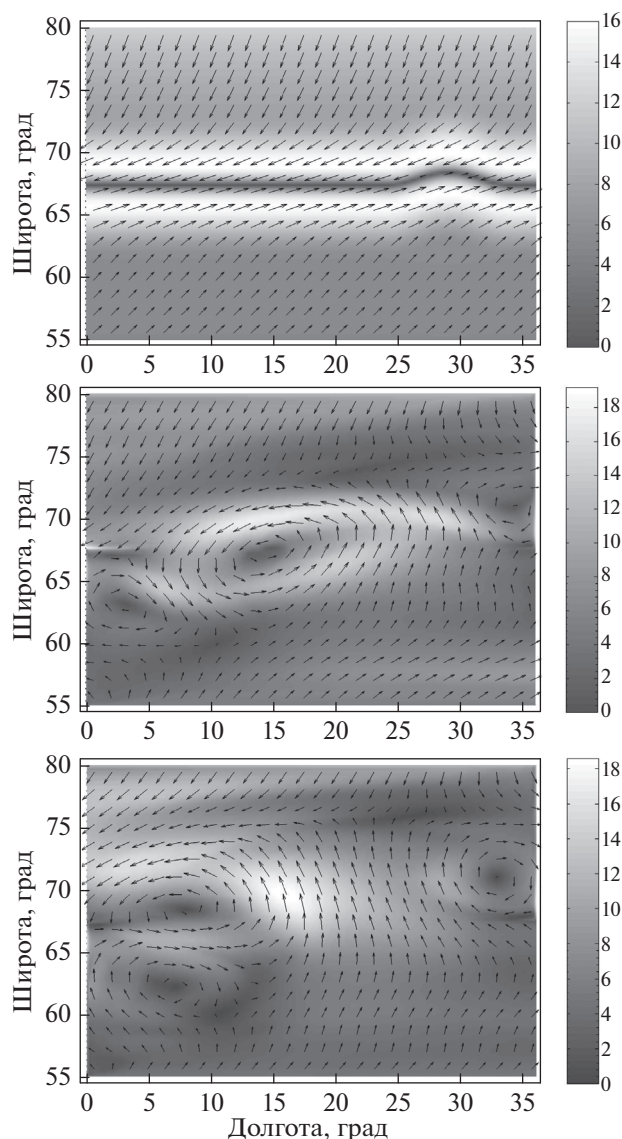


Рис. 2. Представленные в работе [26] распределения горизонтальной составляющей скорости ветра (м/с) на высоте 600 м: заданное в начальный момент (верхняя панель), рассчитанное через 20 ч (средняя панель), рассчитанное через 40 ч (нижняя панель) после начала моделирования для случая, когда в начальный момент арктический фронт имеет отклоненный к северу изогнутый участок фронта, и распределение модуля горизонтальной скорости ветра примерно симметрично относительно центральной линии арктического фронта. Стрелки указывают направление, их длина и яркость фона — величину скорости ветра в м/с.

и западнее изогнутого участка фронта. Центр этого полярного циклона перемещается и через 20 ч после начала моделирования оказывается лежащим на широте примерно 67° с. ш. и примерно на 15° к востоку от западной границы области моделирования. Скорость ветра в этом полярном циклоне достигает 18 м/с в северной его части, а горизон-

тальный поперечный размер этого полярного циклона составляет примерно 600–800 км. С течением времени образовавшийся полярный циклон видоизменяется и перемещается на запад со скоростью 10–15 км/ч. Максимальная скорость ветра в полярном циклоне достигается во временном интервале 15–20 ч после начала моделирования, а затем она начинает медленно уменьшаться.

Можно отметить, что одновременно с зарождением полярного циклона в области моделирования зарождаются два значительно меньших по размерам антициклонических вихря. Один из этих вихрей зарождается западнее и южнее полярного циклона, а второй — восточнее и севернее полярного циклона. Скорость ветра в этих антициклонических вихрях оказывается существенно меньшей, чем в полярном циклоне. Скорости смещения образовавшихся антициклонических вихрей в направлении запад–восток оказываются существенно меньшими, чем скорость смещения полярного циклона.

В левой колонке рис. 3 приведено схематическое представление полученных в [26] и показанных на рис. 2 результатов численного моделирования. На левой верхней панели рис. 2 схематически показана начальная конфигурация арктического фронта, а на левой нижней панели показаны положения сформировавшихся полярного циклона и двух меньших по размерам антициклонических вихрей в момент 40 ч после начала расчетов. В правой колонке рис. 3 приведено схематическое представление полученных в работе [34] аналогичных результатов численного моделирования; только они получены для случая, когда в начальный момент распределение модуля горизонтальной скорости ветра является несимметричным относительно центральной линии арктического фронта. А именно, зональная компонента ветра в точках, лежащих южнее центральной линии фронта, имеет абсолютные значения большие, чем в точках, симметричных относительно центральной линии фронта и лежащих севернее этой линии.

Сравнивая между собой результаты расчетов, приведенные в левой и правой колонках рис. 3, видим, что они имеют сходство. Это неудивительно, поскольку начальные конфигурации арктического фронта в обоих случаях задавались похожими. Однако результаты расчетов, приведенные в левой и правой колонках рис. 3, имеют ряд различий. Например, образовавшиеся полярные циклоны, хотя и имеют близкую по величине максимальную скорость ветра в них, но горизонтальная скорость их перемещения в западном направлении оказывается различающейся примерно на 5 км/ч. Как следствие, центр образовавшегося полярного циклона через 40 ч после начала расчетов в левой колонке рис. 3 оказывается лежащим заметно западнее, чем в правой колонке рис. 3.

Сравним теперь результаты расчетов, приведенные на рис. 2 и 3, с экспериментальными данными,

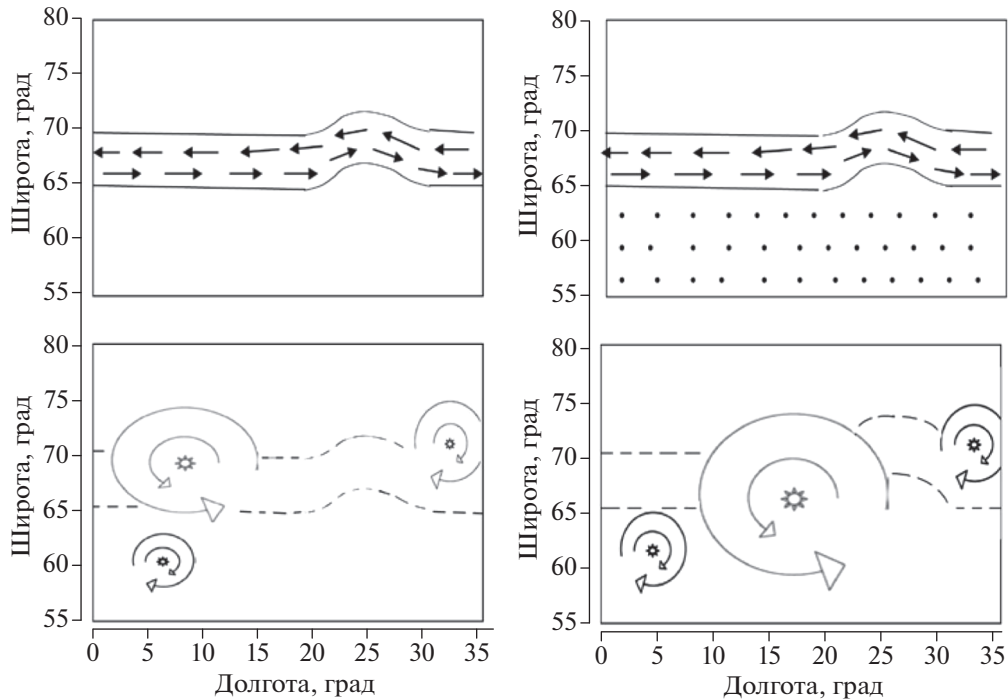


Рис. 3. В левой колонке приведено схематическое представление полученных в работе [26] и показанных на рис. 2 результатов численного моделирования распределения горизонтальной составляющей скорости ветра (м/с) на высоте 600 м; они получены для случая, когда в начальный момент распределение модуля горизонтальной скорости ветра примерно симметрично относительно центральной линии арктического фронта. В правой колонке приведено схематическое представление полученных в работе [34] аналогичных результатов численного моделирования; только они получены для случая, когда в начальный момент распределение модуля горизонтальной скорости ветра является несимметричным относительно центральной линии арктического фронта. Приведены начальные конфигурации арктического фронта (верхние панели), а также положения сформировавшихся полярного циклона и двух меньших по размерам антициклонических вихрей к моменту 40 ч после начала расчетов (нижние панели).

приведенными на рис. 1. Приведенные на левой панели этого рисунка экспериментальные данные получены в момент, когда на арктическом фронте образовалась выпуклость, направленная к северу, которую мы попытались задать в начальный момент своих расчетов. Приведенные на правой панели рис. 1 экспериментальные данные, полученные примерно сутки спустя, свидетельствуют об образовании циклонического вихря с центром, лежащим южнее и западнее первоначального местоположения искривленного участка арктического фронта. В численных расчетах также возник циклонический вихрь с центром, лежащим южнее и западнее первоначального местоположения искривленного участка арктического фронта. Таким образом, результаты расчетов, проведенных для случая, когда в начальный момент арктический фронт имеет отклоненный к северу изогнутый участок фронта, качественно соответствуют экспериментальным данным, приведенным на рис. 1.

Перейдем теперь к рассмотрению результатов численного моделирования для случаев, когда в начальный момент арктический фронт имеет выпуклый в южном направлении участок фронта. Нами были рассмотрены два случая, в одном из

которых в начальный момент распределение модуля горизонтальной скорости ветра является симметричным относительно центральной линии арктического фронта, а в другом случае это распределение является несимметричным. Схематическое представление полученных в рассматриваемых случаях результатов приведено на рис. 4.

В обоих рассматриваемых случаях с течением времени начинается процесс разрушения арктического фронта и формирование полярного циклона, центр которого оказывается лежащим на месте начального положения арктического фронта и восточнее выпуклого участка фронта. Горизонтальный поперечный размер возникшего полярного циклона составляет примерно 600–800 км. Максимальная скорость ветра в полярном циклоне достигается примерно через 20 ч после начала моделирования и может достичь 18 м/с, а затем она начинает медленно уменьшаться. В области моделирования одновременно с зарождением полярного циклона зарождаются два значительно меньших по размерам антициклонических вихря. Что касается различий, то в двух рассматриваемых случаях они проявляются в первую оче-

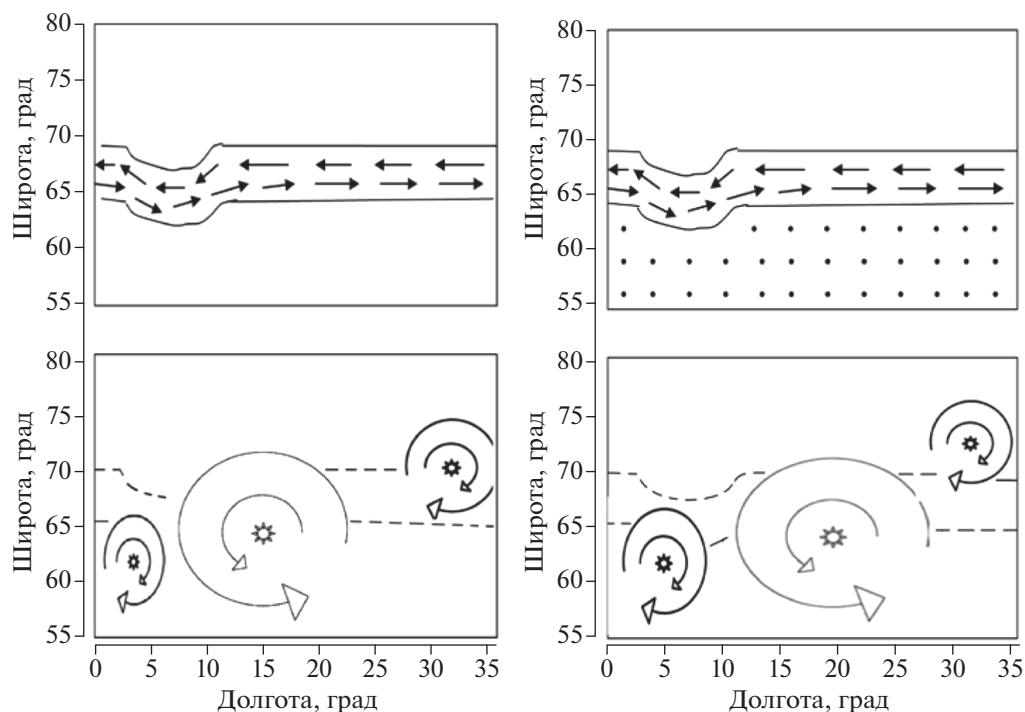


Рис. 4. Схематическое представление полученных в работах [33] (левая колонка) и [34] (правая колонка) результатов численного моделирования на высоте 600 м. Приведенные в левой колонке результаты получены для случая, когда в начальный момент распределение модуля горизонтальной скорости ветра примерно симметрично относительно центральной линии арктического фронта. Приведенные в правой колонке результаты получены для случая, когда в начальный момент распределение модуля горизонтальной скорости ветра является несимметричным относительно центральной линии арктического фронта. Приведены начальные конфигурации арктического фронта (верхние панели), а также положения сформировавшихся полярного циклона и двух меньших по размерам антициклонических вихрей к моменту 40 ч после начала расчетов (нижние панели).

редь в несовпадении скорости перемещения возникшего полярного циклона в юго-восточном направлении.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты численного моделирования, приведенные выше, подтвердили высказанную авторами настоящей работы гипотезу о том, что в механизме возникновения полярных циклонов важную роль может играть трансформация формы арктического фронта, вызванная независимыми внешними причинами. Этот механизм был не так давно впервые предложен в публикациях авторов настоящей работы, а до этого в доступной нам научной литературе никем не обсуждался. Для исследования этого механизма авторами настоящей работы была выполнена серия работ, направленных на моделирование нестационарного процесса формирования полярных циклонов на начальной стадии. Обзор и обобщение результатов, полученных в этой серии работ, и является целью настоящей статьи.

Полученные результаты математического моделирования показывают, что возникновение

выпуклостей в очертаниях арктического фронта, направленных как в северную, так и в южную стороны, может с течением времени привести к разрушению арктического фронта и формированию на его месте полярного циклона. Эти процессы могут сопровождаться зарождением двух значительно меньших по размерам антициклонических вихрей. Горизонтальный поперечный размер возникшего полярного циклона может достигать до 800 км, а максимальная скорость ветра в нем может достигать 18 м/с. С течением времени образовавшийся полярный циклон может перемещаться в горизонтальном направлении, причем скорость и направление его перемещения оказываются разными и зависящими от того, в какую сторону было отклонение начальной выпуклости арктического фронта (к северу или к югу).

Физической причиной возникновения полярного циклона является развитие неустойчивости, инициированной искривлением арктического фронта. При этом кинетическая энергия первоначального крупномасштабного сдвигового течения в области арктического фронта переходит в кинетическую энергию полярного циклона.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Douglas M.W., Fedor L.S., Shapiro M.A. // Mon. Weather Rev. 1991. V. 119. No. 1. P. 32.
2. Montgomery M.T., Farrell B.F. // J. Atm. Sci. 1992. V. 49. No. 24. P. 2484.
3. Nordeng T.E., Rasmussen E.A. // Tellus A. 1992. V. 44. No. 2. P. 81.
4. Douglas M.W., Shapiro M.A., Fedor L.S., Saukkonen L. // Mon. Weather Rev. 1995. V. 123. No. 1. P. 5.
5. Zhang X., Walsh J.E., Zhang J. et al. // J. Clim. 2004. V. 17. No. 12. P. 2300.
6. Sodemann H., Pommier M., Arnold S.R. et al. // Atm. Chem. Phys. Discuss. 2010. V. 10. No. 11. Art. No. 26361.
7. Uotila P., Vihma T., Pezza A.B. et al. // J. Geophys. Res. 2011. V. 116. Art. No. D07109.
8. Tanaka H.L., Yamagami A., Takahashi S. // Polar Sci. 2012. V. 6. No. 1. P. 55.
9. Simmonds I., Rudeva I. // Geophys. Res. Lett. 2012. V. 39. No. 23. Art. No. L23709.
10. Harrold T.W., Browning K.A. // Quart. J. Royal Meteorol. Soc. 1969. V. 95. No. 406. P. 710.
11. Reed R.J. // Mon. Weather Rev. 1979. V. 107. No. 1. P. 38.
12. Rasmussen E. // Quart. J. Royal Meteorol. Soc. 1979. V. 105. No. 45. P. 531.
13. Schubert W.H., Hack J.J. // J. Atm. Sci. 1983. V. 40. No. 6. P. 1571.
14. Emanuel K.A. // Ann. Rev. Fluid Mech. 1991. V. 23. P. 179.
15. Rasmussen E.A., Turner J. Polar lows: mesoscale weather systems in the polar regions. Cambridge Univ. Press, 2003.
16. Golitsyn G.S. // Adv. Atm. Sci. 2009. V. 26. No. 3. P. 585.
17. Shaffrey L., Bresson H., Hodges K., Zappa G. // EGU Gener. Assem. Conf. Abstr. 2020. Art. No. 19488.
18. Nielsen N.W. // J. Geophys. Res. 1997. V. 102. No. D12. Art. No. 13955.
19. Claud C., Heinemann G., Raustein E., McMurdie L. // Quart. J. Royal Meteorol Soc. 2004. V. 130. No. 598. P. 1075.
20. Yanase W., Fu G., Niino H., Kato T. // Mon. Weather Rev. 2004. V. 132. No. 7. P. 1552.
21. Wu L., Petty G.W. // Mon. Weather Rev. 2010. V. 138. No. 6. P. 2211.
22. McInnes H., Kristiansen J., Kristjánsson J.E., Schyberg H. // Quart. J. Royal Meteorol. Soc. 2011. V. 137. No. 660. P. 1674.
23. Føre I., Nordeng T.E. // Quart. J. Royal Meteorol Soc. 2012. V. 138. No. 669. P. 1983.
24. Белоцерковский О.М., Мингалев И.В., Мингалев В.С. и др. // ДАН. 2006. Т. 410. № 6. С. 816; Belotserkovskii O.M., Mingalev I.V., Mingalev V.S. et al. // Dokl. Earth Sci. 2006. V. 411. No. 8. P. 1284.
25. Белоцерковский О.М., Мингалев И.В., Мингалев В.С. и др. // Косм. иссл. 2009. Т. 47. № 6. С. 501; Belotserkovskii O.M., Mingalev I.V., Mingalev V.S. et al. // Cosm. Res. 2009. V. 47. No. 6. P. 466.
26. Мингалев И.В., Орлов К.Г., Мингалев В.С. // Совр. пробл. дистан. зонд. Земли из косм. 2011. Т. 8. № 1. С. 255.
27. Мингалев И.В., Астафьева Н.М., Орлов К.Г. и др. // Косм. иссл. 2012. Т. 50. № 3. С. 242; Mingalev I.V., Astafieva N.M., Orlov K.G. et al. // Cosm. Res. 2012. V. 50. No. 3. P. 233.
28. Mingalev I.V., Astafieva N.M., Orlov K.G. et al. // ISRN Geophys. 2013. Art. No. 215362.
29. Mingalev I.V., Astafieva N.M., Orlov K.G. et al. // Atm. Climate Sci. 2014. V. 4. P. 899.
30. Мингалев И.В., Астафьева Н.М., Орлов К.Г. и др. // Совр. пробл. дистан. зонд. Земли из косм. 2011. Т. 8. № 3. С. 290.
31. Mingalev I.V., Astafieva N.M., Orlov K.G. et al. // Proc. 36th Ann. Sem. Phys. Auroral Phenom. (Apatity, 2013). P. 189.
32. Мингалев И.В., Орлов К.Г., Мингалев В.С. // Proc. 42th Ann. Sem. Phys. Auroral Phenom. (Apatity, 2019). P. 238.
33. Мингалев И.В., Орлов К.Г., Мингалев В.С. // Косм. иссл. 2012. Т. 50. № 2. С. 166; Mingalev I.V., Orlov K.G., Mingalev V.S. // Cosm. Res. 2012. V. 50. No. 2. P. 160.
34. Mingalev I.V., Orlov K.G., Mingalev V.S. // Proc. 36th Ann. Sem. Phys. Auroral Phenom. (Apatity, 2013). P. 193.
35. Mingalev I.V., Orlov K.G., Mingalev V.S. // Adv. Meteorol. 2014. Art. No. 970547.
36. Мингалев В.С., Мингалев И.В., Орлов К.Г. // Вест. Кольск. НЦ РАН. 2015. Т. 2015. № 4. С. 58.
37. Орлов К.Г., Мингалёв И.В., Мингалёв В.С. // Тр. Кольск. НЦ РАН. 2016. Т. 4. № 2. С. 112.
38. Мингалев И.В., Орлов К.Г., Мингалев В.С. // Мат. XV Всеросс. науч. конф. с междунар. участ. "Комплексыные исследования природы Шпицбергена и прилегающего шельфа" (Мурманск, 2020). С. 70.
39. Лоренц Э.Н. Природа и теория общей циркуляции атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1970. 260 с.
40. Логосян Х.П. Общая циркуляция атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1972, 393 с.

Results of numerical modeling of origination of polar lows in the high-latitude atmosphere

I. V. Mingalev^{a, b}, K. G. Orlov^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@pgia.ru

Results of numerical simulation, devoted to time-dependent modeling of the initial stage of the formation of polar lows in the troposphere in the vicinity of the arctic front, are presented. The simulation results indicate that the origin of convexities in the form of the arctic front can lead to the origin of polar lows, having different properties, in the high-latitude atmosphere.