

*Е.В. Заболотских, Л.П. Бобылев, А.В. Дикинис,  
Л.О. Неелова, Ю.Е. Смирнова*

## **ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ И КЛАССИФИКАЦИЯ ШТОРМОВЫХ МЕЗОМАСШТАБНЫХ ВИХРЕЙ**

*E.V. Zabolotskih, L.P. Bobylev, A.V. Dikinis,  
L.O. Neelova, Yu.E. Smirnova*

## **PECULIARITY OF FORMATION AND CLASSIFICATION OF THE STORM MESOSCALE EDDIES**

*Данная статья посвящена исследованию мезомасштабных вихрей – циклонических образований в умеренных и высоких широтах с горизонтальными размерами менее 1000 км, которые зарождаются и продолжают существовать вне прямой связи с фронтальными системами синоптического масштаба.*

*Представлена новая классификация мезомасштабных циклонов, основанная на совместном анализе синоптических карт и космических снимков облачности. Кроме того, исследуются некоторые количественные характеристики «взрывного» циклогенеза, который свойственен именно полярным циклонам.*

*Ключевые слова: мезомасштабные вихри, классификация, синоптические карты, спутниковые изображения, облачность.*

*This paper is devoted to studying such mesoscale eddies as cyclonic forms developing in the moderate and high latitudes with the horizontal extent up to 1000 km, which are born and exist independently of the synoptic scale frontal systems.*

*In this article, a new classification of mesoscale cyclones is presented, which is based on the joint analysis of synoptic maps and satellite images of cloud systems. Besides, some quantitative characteristics of the explosive cyclogenesis, which is typical for polar cyclones, are studied.*

*Key words: mesoscale eddies, classification, synoptic maps, satellite images, cloudiness.*

Мезомасштабными вихрями называют циклонические циркуляции в умеренных и высоких широтах с горизонтальными размерами, не превышающими 1000 км, которые зарождаются и продолжают существовать вне прямой связи с фронтальными системами синоптического масштаба. Наличие таких систем в атмосфере было обнаружено при анализе изображений облачного покрова, полученных со спутников в начале 60-х годов прошлого столетия [Rasmussen, 2003]. В литературе получило распространение несколько названий этого явления: «нефронтальные мезомасштабные вихри», «облачные запятыя», «вторичные циклоны», «завихренности». Наибольшее количество исследований посвящено системам, образующимся зимой в холодных воздушных массах над теплыми акваториями океанов в высоких широтах. Такие мезовихри, образующиеся к полюсу от основной бароклинной зоны, получили название «полярные циклоны» (ПЦ).

Большое количество вихрей образуется в Арктике над свободными ото льда морскими поверхностями в течение зимы. Антарктические мезомасштабные циклоны существенно слабее. Основные районы распространения полярных циклонов в Северном полушарии – это море Бофорта, Норвежское, Баренцево и Гренландское моря, море Лабрадор, пролив Дэвиса, Датский пролив, Охотское и Берингово моря, залив Аляска. Мезоциклоны формируются и развиваются очень быстро. Небольшие размеры, короткий жизненный цикл и недостаточное покрытие открытого моря сетью гидрометеорологических наблюдений приводят к тому, что далеко не все мезоциклоны отмечаются на картах погоды. В то же время они хорошо видны в поле облачности на спутниковых видимых и инфракрасных (ИК) изображениях. Их облачные системы могут принимать вид слабоорганизованного скопления кучево-дождевых облаков, облачной запятой или семейства облачных спиралей, состоящих из конвективных облаков, часто с безоблачным глазом в центре. Развитие таких циклонов характеризуется очень быстрым падением давления. Интерес к изучению ПЦ связан также и с выявленной общностью полярных и тропических циклонов, проявляющейся, в частности, в структуре поля облачности, наличии глаза и теплого ядра [Fu и др., 2004].

Статистика о детальной внутренней структуре мезоциклонов (МЦ) практически отсутствует, поскольку они наблюдаются чаще всего над океанами, где сеть метеорологических измерений недостаточна для их систематического изучения. Однако можно сделать косвенные выводы о внутренней динамике МЦ на основании спутниковых снимков облачного покрова. Последние свидетельствуют о том, что в МЦ существенную роль играют конвективные процессы (облачные системы состоят преимущественно из конвективных облаков).

Мезомасштабным вихрям соответствуют участки повышенной циклонической завихренности в средней тропосфере и повышенная термическая неустойчивость в нижней тропосфере, возникающая в результате перемещения холодной воздушной массы над теплой подстилающей поверхностью. Резюмируя данные о сходстве и отличиях мезомасштабных вихрей от циклонов синоптического масштаба, полученные различными авторами на основании анализа отдельных случаев, можно заключить, что часть таких вихрей, особенно с облачной системой в виде запятой, имеют строение в целом сходное со строением фронтального циклона. В то время как некоторые из них обладают существенной осевой симметрией, характерной скорее для тропических циклонов [Степаненко, 2007].

Первые детальные исследования мезомасштабных погодных систем начались в конце 60-х годов прошлого столетия. С тех пор, почти за полвека, знания о природе этих явлений и механизмах, ответственных за их формирование и развитие, получили существенное развитие, связанное как с появлением новых спутников и приборов, так и с развитием методов их интерпретации, появлением моделей высокого разрешения. Спутниковые снимки высокого разрешения позволили сделать выводы о частоте возникновения таких систем в обоих полушариях и проиллюстрировали широкий диапазон их проявлений на изображениях облач-

ности. Безусловный прогресс достигнут также в представлении мезомасштабных погодных систем в численных моделях. Учитывая небольшие пространственные размеры полярных циклонов, на ранних этапах их изучения ученые сталкивались со значительными трудностями при моделировании. Сегодня новые модели, обладающие высоким пространственным разрешением и адекватной параметризацией физических процессов, способны воспроизводить целый ряд важных случаев, несмотря на нехватку данных, которые можно было бы использовать при анализе.

Для ранних этапов изучения мезомасштабных циклонов характерно рассмотрение отдельных случаев МЦ, базирующееся на визуальном анализе видимых и инфракрасных (ИК) изображений облачного покрова. Данный метод систематического изучения широко используется и в современных исследованиях [Мохов, 2007]. Сегодня, однако, наука о мезомасштабных вихрях привлекает все новые и новые формы данных. В первую очередь, это данные инструментов со спутников с полярной орбитой. Данные микроволновых скаттерометров дают регулярную информацию о полях ветра над свободными ото льда морскими поверхностями. Пассивные микроволновые радиометры позволяют исследовать поля водяного пара, жидкокапельной влаги облаков и осадков над океанами. Наконец, самолетные полеты в циклонах обеспечивают ученых данными об объемной структуре данных. Таким образом, в последние годы наука имеет в своем распоряжении беспрецедентное количество данных для изучения свойств мезомасштабных систем, что особенно ценно для высоких широт, отличающихся практическим отсутствием данных контактных измерений и наблюдений.

Несмотря на большое количество работ по полярным циклонам, опубликованных, начиная с 1960-х, наибольший прогресс в исследовании этих систем связан с публикацией книги «Полярные и Арктические циклоны» в конце 1980-х [Twitchell, 1989]. Эта книга вышла как результат интенсивного периода исследований, выполняемых в рамках большого европейского проекта по норвежским полярным циклонам (Norwegian Polar Lows Project). Данный проект включал работы, посвященные как климатологии и моделированию полярных циклонов, так и совершенствованию системы наблюдений и развитию методов анализа данных.

Дальнейшее совершенствование методов изучения полярных циклонов и других мезомасштабных систем приходится на 90-е годы прошлого столетия. Если ранние исследования концентрировались, главным образом, на Арктике, в 90-е годы появились работы, связанные с антарктическими погодными системами, включая самолетные измерения. Расширение области исследований было связано не только с изменением географии, но и с существенным обогащением нашего представления о мезомасштабных вихрях, которое теперь включало не только интенсивные арктические вихри, но и гораздо менее интенсивные мезовихри Южного полушария.

Наконец, недавние исследования, опирающиеся как на сложный анализ данных различных приборов, так и на современные комплексные модели высокого разрешения, – это новый шаг вперед в науке о полярных циклонах.

Обзор работ последних лет невозможен без упоминания основополагающих исторических работ, лежащих в основе всей современной науки о полярных циклонах.

Классики этой науки – Erik Rasmussen и John Turner – в вопросе определений предложили относить к собственно полярным циклонам наиболее интенсивные мезовихри [Rasmussen, 2003]. Большой диапазон мезомасштабных вихрей с горизонтальным масштабом до 1000 км, возникающих к полюсу от основного полярного фронта или других основных фронтальных зон, покрывает огромное количество погодных систем от незначительных, слабых вихрей, практически без поверхностной циркуляции, до исключительно активных систем, сопровождаемых ураганскими ветрами и мощными осадками, – полярных циклонов.

Одна из первых ссылок на явление, известное сегодня как «полярный циклон», была сделана Peter Dannevig в книге для пилотов в 1954 г., где он написал о «циклонах неустойчивости» над морскими пространствами вокруг Норвегии. Он предположил что подобные циклоны развиваются так же, как и тропические, и рассмотрел возможные механизмы их формирования.

Норвежский исследователь Asmund Rabbe в своей работе [Rabbe, 1975] представил несколько случаев полярных циклонов вокруг Норвегии и объяснил механизм их формирования передачей энергии от океана в атмосферу. В этой же статье он высказал убеждение в невозможности предсказания на тот момент возникновения этих опаснейших мезомасштабных погодных явлений.

Помимо норвежских ученых, английские метеорологи внесли большой вклад в ранние работы по полярным циклонам. В первую очередь это связано с частыми снегопадами невиданной силы, являющимися следствием как раз диссипации мощных полярных циклонов над Британскими островами, особенно над Шотландией. В Британии такие системы называли также «холодными воздушными депрессиями». Исследования британских ученых базировались исключительно на наблюдениях, а первый спутниковый снимок мезоциклона, представляющего активный полярный циклон с облачной сигнатурой в форме запятой, был опубликован в 1970 г. [Suttie, 1970].

С появлением снимков с полярно-орбитальных спутников в 1960-е годы начался невиданный прогресс в изучении полярных циклонов. В первые годы это были всего лишь бумажные копии ИК и реже видимых изображений. Затем появилось большое разнообразие снимков, включая данные зондировщиков, скаттерометрические измерения для оценки скоростей ветра над морем и микроволновые данные.

Высокоширотные спутниковые снимки подтвердили высокую частоту возникновения полярных циклонов в Арктике и продемонстрировали широкий диапазон облачных сигнатур, их сопровождающих, включая одну из самых распространенных – «облачную запятую», особую форму полярного циклона [Anderson, 1969].

Одновременно с ранними работами, посвященными анализу данных наблюдений, развивались и теоретические исследования. Ранние теоретические работы, рассматривавшие всего два механизма, ответственные за формирование мезовихрей. Часть ученых [Harrold, 1969; Duncan, 1977] считали главной причиной образования мезовихрей бароклинную неустойчивость, в то время как другая школа этой причиной называла условную неустойчивость второго рода [Rasmussen, 1979]. Сегодня ученые полагают, что в основе механизмов, ответственных за образование мезовихрей, лежат как бароклинные, так и конвективные процессы, и оба процесса могут быть вовлечены в жизненный цикл одного единственного полярного циклона.

Мощный толчок исследованиям мезовихрей придал запуск проекта Norwegian Polar Lows Project, длившийся с 1983 по 1985 г. Этот международный проект имел своей целью улучшить понимание явления мощных мезовихрей, обладающих огромной разрушительной силой и представляющих опасность для нефте- и газодобывающей промышленности, мореплавания, береговых предприятий и т.д. В рамках данного проекта были проведены первые самолетные измерения внутри циклона [Shapiro, 1987], создана первая климатология полярных циклонов [Wilhelmsen, 1985] и предложены первые усовершенствованные модели развития циклонов [Nordeng, 1987].

В 1980-е годы внимание ученых стали привлекать не только арктические мезовихри, но и циклоны, развивающиеся над другими районами. Анализ спутниковых изображений позволил сделать вывод, что множество мезовихрей наблюдаются на севере Тихого океана [Businger, 1987], над Японским морем [Ninomiya, 1989] и в Южном полушарии.

### **Анализ синоптических ситуаций, сопровождающих развитие полярных циклонов**

В течение нескольких последних декад экспериментальные исследования в форме рассмотрения и анализа конкретных ситуаций составляли основную массу работ, связанных с попытками изучить структуру и развитие мезовихрей. В течение этих лет различные исследователи изучали различные формы проявлений мезовихрей в разных районах земного шара. Стремление обобщить и классифицировать мезовихри всегда базировались как на их проявлениях на спутниковых изображениях, так и на механизмах их формирования, обусловленных той или иной синоптической ситуацией.

Согласно работе [Rasmussen, 2003], мезовихри проявляются в виде различных форм – от «чисто конвективных систем» до «чисто бароклильных систем». Часть полярных циклонов формируется вблизи ледовой кромки вдоль неглубоких бароклильных зон, характерных для этих районов. Другая, не менее обширная, часть циклонов формируется в баротропных, вертикально неустойчивых воздушных массах. Часть вихрей возникает ближе к основной бароклильной зоне. Поскольку целый спектр механизмов лежит в основе возникновения полярных циклонов, существует целый «спектр полярных циклонов».

Попытки определения «спектра полярных циклонов» впервые были сделаны в работе [Bussinger, 1989]. Авторы этой работы выделили три типа полярных циклонов, базируясь на строго определенной синоптической ситуации:

1) коротковолновый/струйный тип, характеризующийся максимумом вторичного завихрения и положительной адвекцией вихря в верхних слоях атмосферы, глубокой или средней бароклинностью и небольшими поверхностными потоками;

2) арктическо-фронтальный тип, ассоциирующийся с близостью ледовой кромки и характеризующийся неглубокой бароклинностью и сильными поверхностными потоками;

3) тип, связанный с наличием областей холодных барических минимумов, характеризующийся слабой бароклинностью, сильными поверхностными потоками и глубокой конвекцией (холодные вторжения).

В дальнейшем авторы [Rasmussen and Turner, 2003] расширили предложенную классификацию «спектра полярных циклонов», основываясь опять же на четко определенной синоптической картину циклона и – частично – на представление о механизме их формирования. Предложенная авторами схема является достаточно обобщающей, так что любой случай мезовихря может быть отнесен к той или иной группе из табл. 1. Авторы, однако, подчеркивают, что предложенную классификацию ни в коей мере не следует считать «динамической классификацией», базирующейся лишь на механизмах, вовлеченных в формирование мезовихря. Принадлежность к той или иной группе из «спектра полярных циклонов» можно считать лишь условной, продиктованной стремлением выделить основные отличительные признаки мезовихря в рамках ограниченного набора категорий.

*Таблица 1*

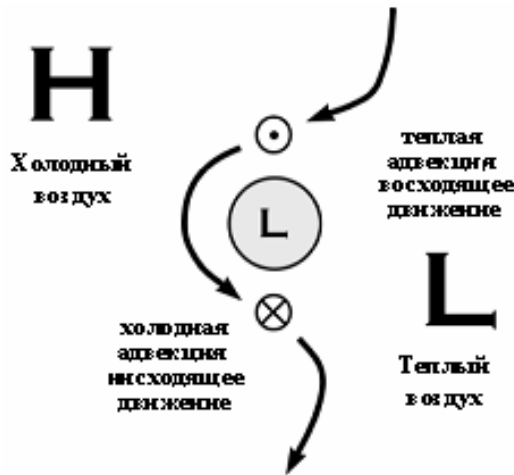
**Классификация мезомасштабных циклонов,  
проведенная на основании анализа синоптических данных**

Группа	Название
1	Системы реверсивной кривизны
2	Барические ложбины
3	Фронты в погранслое атмосферы
4	Холодные депрессии (включая вихревые системы)
5	Облачные запяты
6	Бароклинные волны – системы прямых сдвигов
7	Орографические полярные циклоны

### **1. Системы реверсивной кривизны**

Системы реверсивной кривизны составляют существенную часть полярных циклонов. В противоположность классическим бароклиненным системам [Holton, 2004] условия в системах реверсивной кривизны таковы, что вектор скорости ветра на нижнем управляющем уровне непараллелен термическому ветру на примыкающих уровнях. Скорость ветра, как правило, уменьшается с высотой, и имеется прямое смещение возмущений в вертикальном направлении. Типичные

примеры таких условий встречаются во время положительных фаз Северного Атлантического Колебания, когда теплые циклоны синоптического масштаба вторгаются в воздушные пространства над Норвежским морем с юга [Kolstad, 2009]. Если холодные фронты подобных систем связаны с инверсией над льдом, сухой холодный воздух выталкивается на юг, уменьшая таким образом статическую устойчивость [Wu, 2004].



Системы реверсивной кривизны отличаются от широко известных бароклинных возмущений, в которых развитие и движение атмосферных масс регулируются высотными ложбинами. В классическом случае теплый воздух лежит справа от основного потока, так что термический ветер параллелен этому потоку. Термин «реверсивная кривизна» означает, что термический ветер антипараллелен потоку. Теперь теплый воздух лежит слева. Управляющий уровень обычно существенно ниже 500 гПа и скорость ветра уменьшается с высотой. За зоной возмущения имеет место теплая адвекция и восходящее движение, в то время как вниз по потоку присутствует холодная адвекция и нисходящее движение [Businger, 1989]. Другими словами, устанавливается прямая термическая циркуляция. Дальнейшая интенсификация процесса может быть вызвана неадиабатическим нагревом вблизи поверхности вследствие высвобождения скрытого и явного тепла в результате холодной адвекции над теплыми водами океана.

Анализ данных наблюдений позволяет предположить, что рассматриваемые системы могут возникнуть при наличии высотных возмущений в форме высотных холодных ложбин короткой волны, а развитию этих систем способствуют как бароклинная неустойчивость, так и мощная конвекция.

Северное Атлантическое течение несет теплые соленые воды в Арктический бассейн [Orvik, 2002], приводя к тому, что даже в середине зимы температура поверхности остается достаточно высокой. В положительные фазы Северо-

Атлантического колебания шторма распространяются над Норвежским и Баренцевым морями с юго-востока. Близость льда часто приводит к низкой статической устойчивости и возникновению систем реверсивной кривизны в северных потоках, следующих за холодными фронтами таких циклонов. В статье [Harold, 1999] авторы обнаружили существенную корреляцию мезоциклонов диаметром 200–400 и 400–600 км с индексом Северо-Атлантического колебания. Более того, было замечено, что системы реверсивной кривизны часто развиваются в тылу циклонов синоптического масштаба, а Норвежское и Баренцево моря являются основными районами возникновения подобных систем, что подтверждено многочисленными рассмотренными случаями и модельными расчетами.

На рис. 1 представлен инфракрасный снимок NOAA 11 AVHRR радиометра (4-й канал).

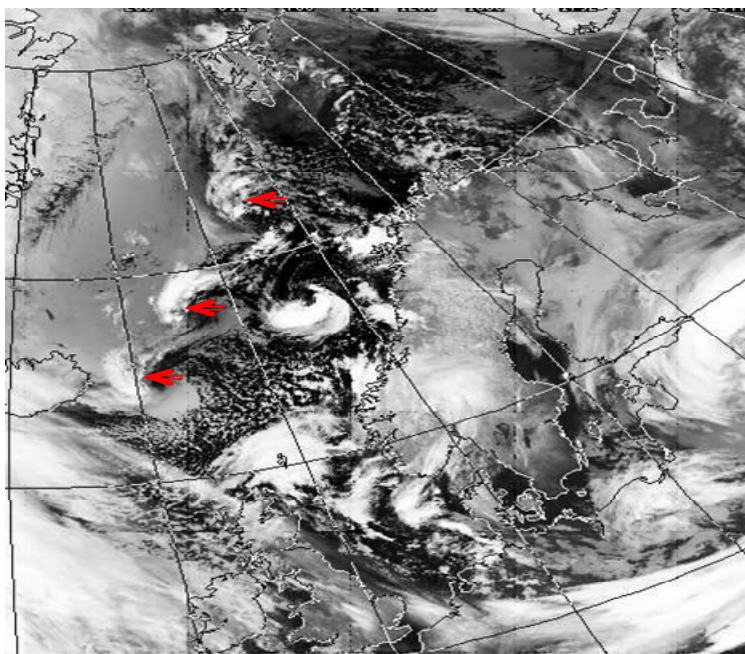


Рис. 1. Инфракрасный снимок NOAA 11 AVHRR радиометра (4-й канал)  
20 марта 1994 г., 5:26

Цепочка циклонов, относящихся к системам реверсивной кривизны, возникшим на границе между холодной воздушной массой, примыкающей к побережью Гренландии, и теплой воздушной массой на востоке.

Широко известная форма «лебедя» является не чем иным, как системой реверсивной кривизны, образовавшейся в тылу синоптического циклона. В этом случае «хвост» полярного циклона относится к «родительскому» циклону синоптического масштаба, как показано, например, на рис. 2.



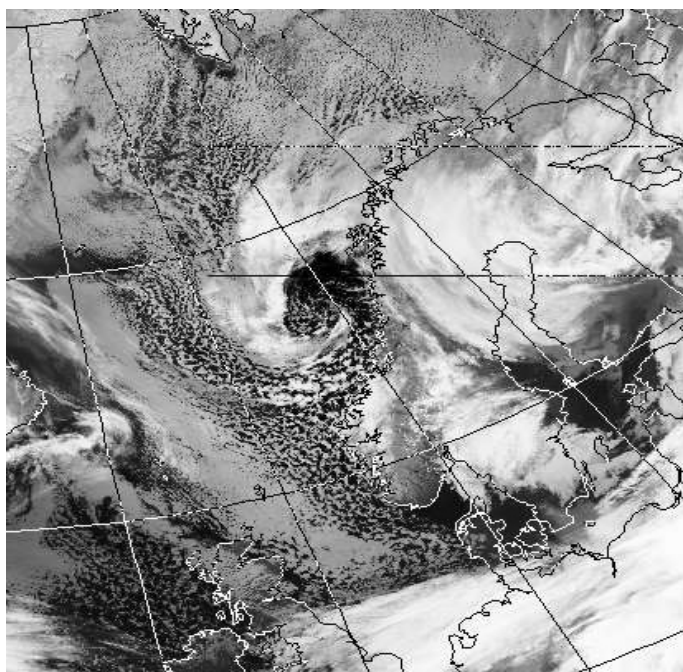


Рис. 2. Инфракрасный снимок NOAA 6 AVHRR радиометра (4-й канал) 4 декабря 1981 г., 8:41  
Классическая «Форма лебедя», относящаяся к системе реверсивной кривизны,  
возникшей в тылу циклона синоптического масштаба

## 2. Барические ложбины

Зимой ряд крупномасштабных циклонов развивается вдоль основной траектории циклонов, проходящей над северной частью Норвежского моря в Баренцево море. В этой ситуации полярные циклоны могут образоваться в тыловых ложбинах, ориентированных с востока на запад и характеризующихся высокими значениями завихренности в приземном слое на западном крае циклонов синоптического масштаба. Полярные циклоны, образующиеся на фоне подобной синоптической ситуации, относятся к группе так называемых «барических ложбин». Анализ высотных карт погоды позволяет сделать вывод, что механизм возникновения подобных мезовихрей запускается наличием высотных холодных ложбин короткой волны. Пример полярного циклона такого типа, обладающего ярко выраженной вихревой структурой, представлен на рис. 3.

Полярные циклоны такого типа чаще всего образуются севернее  $70^{\circ}$  с. ш., однако их можно встретить также и в других регионах.

Для данной группы характерно также возникновение одновременно нескольких полярных циклонов, и некоторые авторы выделяют среди нее следующие два подкласса:

- мезоциклоны, образующиеся вследствие «фронтальной неустойчивости» и характеризующиеся квазиодновременным ростом нескольких мезоциклонов;

• мезоциклоны, образующиеся как результат развития «вниз по потоку», которые требуют наличия первого циклона, дающего начало последующему развитию новых циклонов.

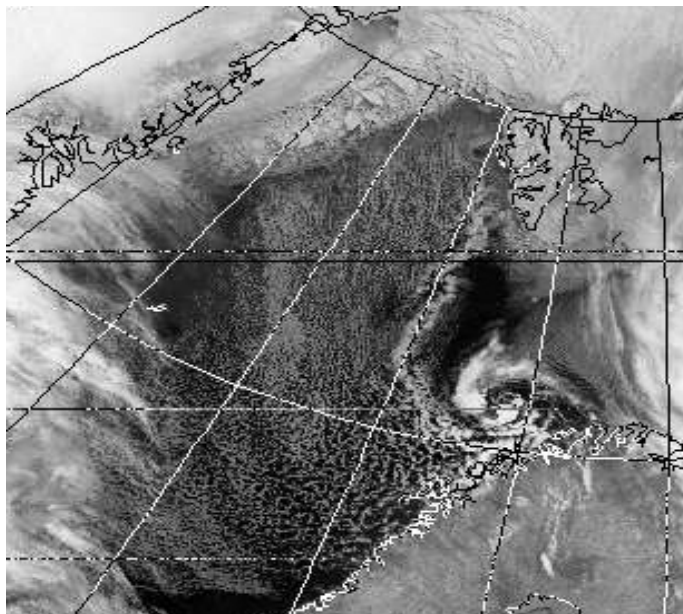


Рис. 3. Инфракрасный снимок NOAA 6 AVHRR радиометра (4-й канал) 26 марта 1981 г., 17:56  
Полярный циклон со спиралевидной структурой облачности, образовавшийся в барической ложбине на западном крае циклона синоптического масштаба

### **3. Фронты в погранслое атмосферы**

Большое количество спутниковых снимков задокументировало частое возникновение фронтов вдоль и южнее западного побережья Шпицбергена, сопровождающее северные крупномасштабные потоки. Фронты в погранслое атмосферы возникают вблизи ледовой кромки и отделяют приземные арктические массы от более теплых, морских полярных воздушных масс. Ориентация облачных дорожек часто свидетельствует о наличии мощного ветрового сдвига в приземной области поперек фронта, поперечные размеры которого не превышают нескольких десятков километров. Вдоль таких фронтов можно обнаружить большое количество мелкомасштабных вихрей. Отдельные вихри обычно остаются мелкомасштабными, не развиваясь в более мощные структуры. Иногда, крайне редко, такие вихри могут получить дальнейшее развитие, в том случае, когда имеет место высотное воздействие, как правило, в виде ложбины короткой волны. В таком случае мелкомасштабный вихрь может развиваться в полярный циклон.

Мезоциклоны, относящиеся к данной группе, были обнаружены в самых разных районах, включая береговой район Новой Земли, и вблизи Японских островов.

Пример циклонов, образовавшихся на фронте в погранслое атмосферы, приведен на рис. 4, на котором показано инфракрасное изображение Норвежского моря, иллюстрирующее развитие полярного циклона на южном краю пограничного фронта под Шпицбергером. Одновременно на снимке наблюдается несколько мелкомасштабных вихрей вдоль фронта, но лишь один из них формируется в полярный циклон.

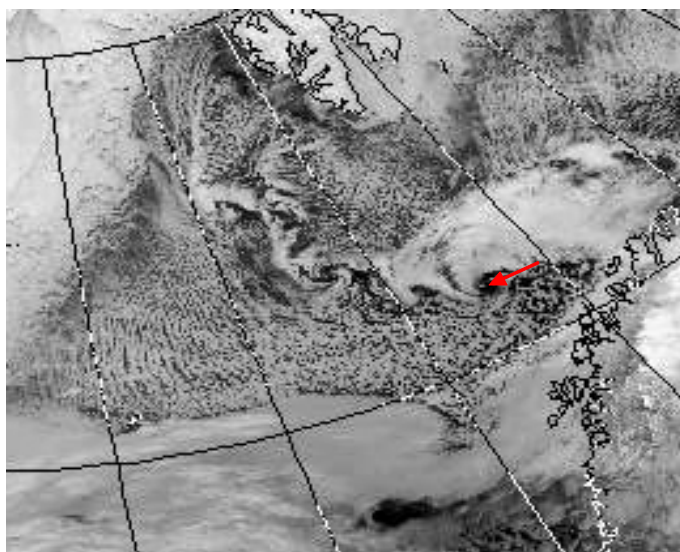


Рис. 4. Инфракрасный снимок NOAA 6 AVHRR радиометра (4-й канал) 2 марта 1981 г., 8:44. Мезовихри, образовавшиеся на фронте в погранслое атмосферы. Крайний мезовихрь развивается в полярный циклон

#### 4. Циклоны, сформировавшиеся внутри холодных депрессий

Небольшие спиралевидные, а иногда обладающие формой запятой, конвективные облачные образования наблюдаются часто внутри центральной части старых окклюзий холодных фронтов, без какой-либо видимой связи с высотными короткими волнами или бароклинными особенностями приземного слоя. Этот тип циклонов является одним из самых распространенных и составляет группу так называемых «холодных депрессий». Крупномасштабные холодные депрессии обладают холодным ядром, благодаря которому интенсивность их циркуляции возрастает с высотой. Они также часто сопровождаются ярко выраженными облачными спиралями, и очень часто их определяют как «настоящие» полярные циклоны, в отличие, например, от менее резко выраженных облачных запяток. Часто развитие подобных систем в Арктике инициируется возрастанием циркуляции в приземном слое, когда холодные воздушные массы движутся над теплыми водами океана – так называемые, холодные вторжения.

Источником полярных циклонов, относящихся к группе холодных депрессий и обнаруженных внутри околполярного вихря, являются, по-видимому,

бароклинные волны синоптического масштаба, большинство из которых окклюдирует раньше, чем достигнет высоких арктических широт.

Часть полярных циклонов этого типа обнаруживается даже летом. Однако большинство случаев наблюдается в осенне-зимне-весенний период, для которого наиболее характерны холодные вторжения.

Большинство верхнеуровневых холодных депрессий не сопровождается сколько-нибудь значительной поверхностной циркуляцией до тех пор, пока они остаются надо льдом, благодаря наличию исключительно устойчивого пограничного слоя атмосферы. И только при движении над открытыми районами океана вихревые структуры верхнего уровня могут проникнуть вниз, к поверхности, и развиваться в полярный циклон. Этот путь формирования полярных циклонов характерен для центральной части верхнеуровневых холодных депрессий, где наблюдаются минимальные температуры, в то время как динамическое воздействие, связанное с положительной адвекцией вихря (ПАВ) в верхних слоях атмосферы, оказывается весьма незначительным или вовсе отсутствует.

Пример полярного циклона, сформировавшегося внутри центрального холодного ядра, приведен на рис. 5.

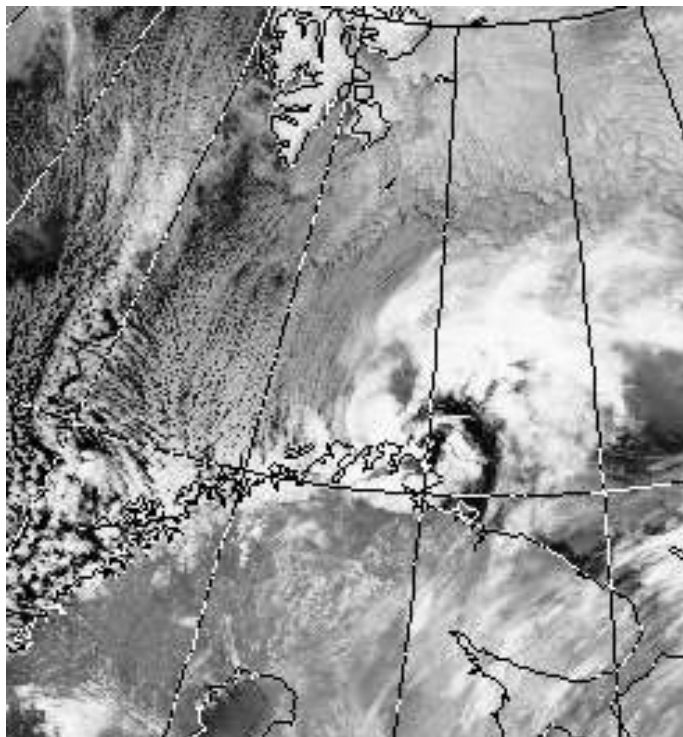


Рис. 5. Инфракрасный снимок NOAA 6 AVHRR радиометра (4-й канал) 27 января 1982 г., 12:33  
Полностью сформировавшийся полярный циклон,  
образовавшийся в центре холодного барического минимума

Полярные циклоны этого типа часто развиваются внутри ядра холодных вихрей, образовавшихся в результате окклюзии крупномасштабных внетропических циклонов. В дополнение к мезовихрям, образующимся в центральной области циклонического поля ветра окклюзированной системы, ряд полярных циклонов может сформироваться вдоль окклюзированного фронта, как показано на рис. 6 (а, б).

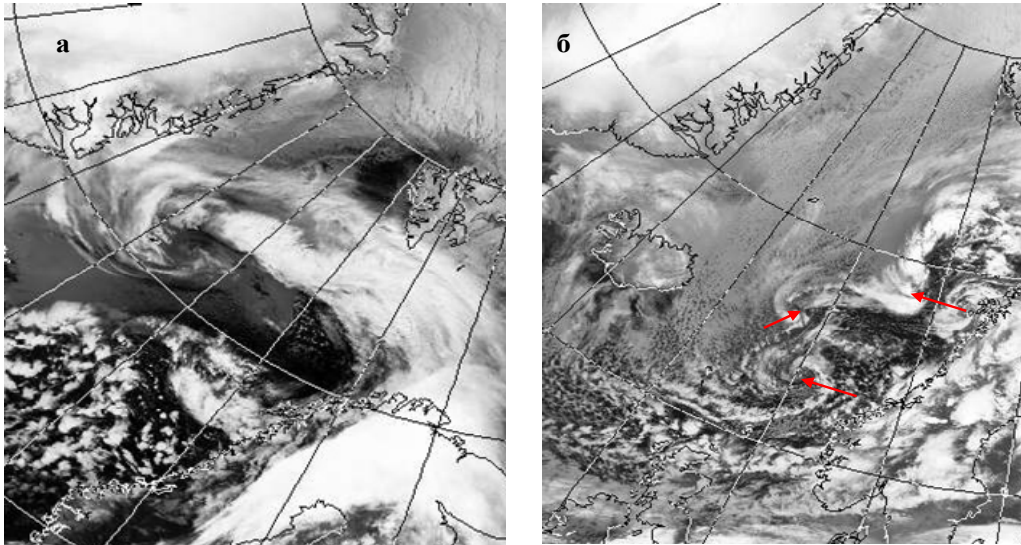


Рис. 6. Инфракрасные изображения NOAA 14 AVHRR радиометра (4-й канал) (а) 26 февраля 1998 г., 11:39  
Окклюзированный внетропический циклон над северо-западной Европой (б) 27 февраля 1998 г., 13:08  
Цепочка мезовихрей над Норвежским морем, сформировавшаяся вдоль фронта окклюзии циклона, видимого на изображении (а)

Отдельную группу циклонов, сформировавшихся на фоне холодных депрессий, составляют так называемые «карусели». Термин (в англоязычной литературе «теггу-го-гаунд») используется для мезовихрей, состоящих из нескольких небольших циклонов, вращающихся вокруг общего центра. Основной особенностью таких систем является наличие вихря синоптического масштаба, обладающего холодным ядром и являющегося, как правило, конечным результатом процесса окклюзии. Другим путем «карусели» структуры могут образоваться при движении холодного барического минимума, берущего свое начало над Арктикой, над открытыми водами океана, и вызывающего развитие циклонической поверхностной циркуляции.

### **5. Облачные запяты**

Полярные циклоны, имеющие характерный вид запятой сопутствующей облачности, получили название «облачных запяты». Этот тип мезовихрей на-

блюдается в районах, для которых характерна глубокая бароклинность, расположенная на холодной стороне бароклинной зоны, где подобные вихри обладают большим запасом потенциальной энергии, необходимой для своего развития. Облачные запятые развиваются в районах повышенной организованной конвекции, и их образование связано с довольно слабыми поверхностными системами в виде ложбин вдоль заднего края хвостовой части запятой или со слабыми поверхностными барическими минимумами.

Облачные запятые многие исследователи выделяют как погодную систему, отличную от истинно полярных циклонов, поскольку энергия таких систем не столь велика, как скажем, у структур типа «каруселей». Однако некоторые из облачных запятых могут развиваться в исключительной силы поверхностные циркуляции, т.е. настоящие полярные циклоны. Пример подобного мезовихря проиллюстрирован на рис. 7.

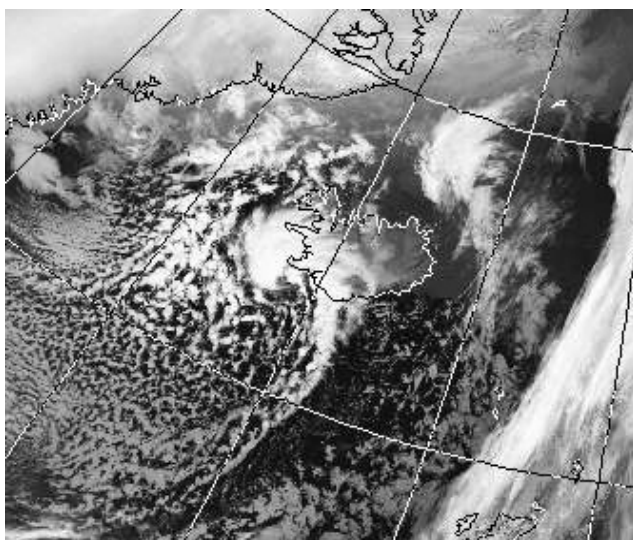


Рис. 7. Инфракрасное изображение NOAA 9 AVHRR радиометра (4-й канал) 8 марта 1988 г., 15:28  
Полярный циклон типа «облачной запятой», сформировавшийся западнее Исландии,  
1000 км западнее облачной полосы в зоне полярного фронта

### **6. Бароклинные волны**

Бароклинная нестабильность в течение многих лет считалась основным условием формирования полярных циклонов – начиная с работы [Harrold, 1969] «Полярный циклон как бароклинное возмущение». Бароклинное развитие в своей чистой форме характеризуется устойчивым подъемом, ведущим к образованию характерной слоистообразной облачной структуры.

### **7. Oroграфические полярные циклоны**

Oрографические полярные циклоны развиваются вследствие влияния орографии как основного фактора, определяющего их формирование [Martin, 2006].

Орография играет важную роль в развитии полярных циклонов во многих районах. Например, в периоды преобладающих северных потоков воздуха вихри образуются с подветренной стороны Исландии. Другой регион, в котором орография оказывает существенное влияние на образование мезовихрей, – это моря на востоке и северо-востоке мыса Фаруэлла. Здесь мезовихри могут формироваться, когда западные и северо-западные потоки вынуждены подниматься над горами или обтекать их в связи с вторжениями холодного воздуха с Северо-Американского континента.

Вокруг Скандинавии полярные циклоны могут образовываться как вторичные циркуляции с подветренной стороны гор Норвегии как результат влияния орографии, когда основная циркуляция движется на восток.

### **Основные движущие механизмы, ответственные за возникновение полярных циклонов**

Обобщение исследований синоптической картины, сопровождающей зарождение полярных циклонов, позволяет провести некую условную классификацию движущих механизмов, ответственных за их возникновение. Следует, однако, помнить, что в большинстве случаев имеет место взаимодействие ряда причин, и приведенная классификация служит лишь для выделения отдельных физических механизмов, связанных с зарождением мезовихрей.

#### **1. Потоки активного и скрытого тепла**

При движении холодной массы воздуха над водной поверхностью происходит передача активного тепла от воды воздуху, что снижает устойчивость приземного слоя атмосферы. Холодная масса воздуха обладает низкой потенциальной температурой смоченного термометра, и происходит быстрая передача влажности в более холодный воздух через поток активного тепла. Облака обычно формируются вскоре после того, как воздушная масса начинает свое движение над океаном, означая высвобождение скрытого тепла. Эта глубокая конвекция часто связана с развитием полярного циклона.

В работе [Mullen, 1983] указывается, что само по себе движение холодных воздушных масс над теплыми океаническими водами не ответственно напрямую за циклогенезис. Оно лишь служит причиной установления благоприятных условий для формирования мезовихрей в ответ на другие внешние воздействия.

#### **2. Бароклинная неустойчивость**

Бароклинная неустойчивость связана с вертикальным сдвигом среднего потока. Бароклинные неустойчивости возникают за счет потенциальной энергии, связанной со средними горизонтальными градиентами температуры.

Повышенные бароклинные зоны в приземном слое могут развиваться по различным причинам:

1) поверхностные потоки могут стать параллельны краю пакового льда, создавая таким образом условия для образования резких бароклинных зон;

2) конвергенция в поле скоростей ветра также может привести к образованию зон повышенной бароклинности. В этом случае полярный циклон может образоваться на значительном расстоянии от ледовой кромки.

### **3. Баротропная неустойчивость**

Баротропная неустойчивость – это волновая неустойчивость, связанная с горизонтальным сдвигом в струйных течениях. Баротропные неустойчивости возникают за счет кинетической энергии среднего потока.

Баротропная неустойчивость может привести к образованию приземных вихрей сдвига. Эти вихри при благоприятных условиях могут развиваться в полярные циклоны.

### **4. Холодные высотные ложбины и депрессии**

Если в холодной воздушной массе сформировались синоптические условия типа приземной бароклинной волны, баротропного вихря сдвига или повышенной конвекции, это необязательно приведет к образованию полярного циклона. В случае прямого высотного потока с незначительной адвекцией вихря полярный циклон не сформируется даже в случае очень низких температур в верхних слоях атмосферы [Rasmussen, 1992]. Один из легко объяснимых механизмов формирования полярного циклона – наличие холодной высотной ложбины и/или замкнутого высотного вихря с холодным ядром. Например, авторы утверждают, что все исследованные ими случаи полярных циклонов в море Лабрадор так или иначе связаны с высотными холодными ложбинами или депрессиями.

Авторы работы [Noer, 2003] продемонстрировали, что во всех исследованных ими случаях наличие высотных холодных ложбин или вихрей было связано с развитием циклона. Более того, часто сила и направление движения этого высотного воздействия может позволить спрогнозировать последующую эволюцию развития мезоциклона.

### **5. Условная неустойчивость второго рода**

Внешнее подобие в проявлениях полярных и тропических циклонов позволила многим исследователям полагать, что и механизмы формирования этих систем могут быть аналогичными. Условная неустойчивость второго рода представляет собой взаимодействие между мелкомасштабной конвекцией с образованием кучевых облаков и крупномасштабными возмущениями, при котором: 1) крупномасштабная конвергенция приводит к конвекции с образованием кучевых облаков; 2) высвобождающееся при конденсации тепло, в свою очередь, является источником энергии для крупномасштабных систем.

### **6. Неустойчивость взаимодействия океана и атмосферы**

В работе [Emanuel, 1989] оспаривается идея условной неустойчивости второго рода как движущего механизма образования тропических циклонов. Авторы предложили неустойчивость взаимодействия океана и атмосферы как главный фактор в формировании циклонов. Аномально высокие поверхностные по-



токи активного и скрытого тепла, вызванные сильными поверхностными ветрами и снижающимся давлением, приводят к увеличивающимся температурным аномалиям и, таким образом, к дальнейшему росту ветра и падению давления. Результаты анализа развития отдельно взятого полярного циклона оказались в хорошем соответствии с предложенной моделью, но только в том случае, когда в модели использовалось дополнительное возмущение в качестве механизма, запускающего развитие циклона.

### Заключение

Изучение механизмов формирования мезомасштабных вихрей, их характеристик, отслеживание движения и, по возможности, прогнозирование представляют одну из важнейших задач современной науки. Особую актуальность для российской науки эти исследования приобретают в связи с резким уменьшением в последние годы площади Северного Ледовитого океана, покрытой многолетними морскими льдами. Причиной сокращения площади ледяного покрова в Арктике становится наблюдаемое значительное потепление климата. Оно накладывается на погодные явления, которые также вызывают уменьшение площади льдов. В 2007 г. была зафиксирована минимальная площадь льдов. С появлением новых районов открытой воды связано появление новых районов, потенциально пригодных для зарождения полярных циклонов. Такие моря, как Восточно-Сибирское, Чукотское, море Лаптевых, раньше закрытые ледяным покровом в течение всего года, к осени становятся свободными ото льда, а значит, подверженными возникновению и развитию полярных циклонов.

Данные наземных измерений в районах основного распространения полярных циклонов получать крайне затруднительно. Появление в последние годы спутников, оснащенных активными и пассивными микроволновыми приборами, обладающих более высоким разрешением и широкой полосой обзора, значительно расширило возможности, связанные с получением информации о полярных мезовихрях. В сочетании со спутниковыми изображениями облачности, с данными гидрометеорологических станций на побережье и результатами моделирования это дает возможность исследовать зарождение и эволюцию мезомасштабных вихрей со значительно более высоким временным разрешением, детальностью и точностью, чем это было возможно ранее.

### Литература

1. *Мохов И.И., Акперов М.Г., Лагун В.Е., Луценко Э.И.* Интенсивные арктические мезоциклоны // Изв. РАН. Физика океана и атмосферы, 2007, т. 43(3), с. 291–297.
2. *Степаненко В.М., Вельтищев Н.Ф.* Мезометеорологические процессы. – М.: Изд. «Географический факультет МГУ», 2007. – 127 с.
3. *Anderson R.K., Ashman J.P., Bittner F., Farr G.R., Ferguson E.W., Oliver V.J., Smith A.H.* Application of meteorological satellite data in analysis and forecasting, ESSA Tech. Rep. NES-51, U.S. Dept. of Commerce, Washington, D.C., 1969.
4. *Businger S.* The synoptic climatology of polar low outbreaks over the Gulf of Alaska and the Bering Sea // *Tellus*, 1987, vol. 39A, p. 307–325.

5. *Businger S., R. Reed.* Cyclogenesis in cold air masses // *Weather Forecasting*, 1989, vol. 4, no. 2, p. 133–156.
6. *Duncan C. N.* A numerical investigation of polar lows // *Quart. J. R. Meteorol. Soc.*, 1977, vol. 103, p. 255–267.
7. *Emanuel K. A. and Rotunno R.* Polar lows as arctic hurricanes // *Tellus*, 1989, vol. 41A, p. 1–17.
8. *Fu G., Niino H., Kimura R., Kato T.* A polar low over the Japan Sea on 21 January 1997. Part I: Observational analysis // *Monthly Weather Review*, 2004, vol. 132, p. 1537–1551.
9. *Harrold T.W., Browning K.A.* The polar low as a baroclinic disturbance // *Quart. J. R. Meteorol. Soc.*, 1969, vol. 95, p. 710–723.
10. *Harold J.M., Bigg G.R., Turner J.* Mesocyclone activities over the north-east Atlantic. Part 2: an investigation of causal mechanisms // *Int. J. Climatol.*, 1999, vol. 19, p. 1283–1299.
11. *Holton J.R.* An Introduction to Dynamic Meteorology. – Elsevier, Academic Press, 2004. – 350 p.
12. *Kolstad E.W., Bracegirdle T.J., Seierstad I.A.* Marine cold-air outbreaks in the North Atlantic: temporal distribution and associations with large-scale atmospheric circulation // *Climate Dynamics*, 2009, vol. 33(2), p. 187–197. (doi:10.1007/s00382-008-0431-5).
13. *Martin R., Moore G.W.K.* Transition of a synoptic system to a polar low via interaction with the orography of Greenland // *Tellus*, 2006, vol. 58A, p. 236–253.
14. *Mullen S.* Explosive cyclogenesis associated with cyclones in polar air streams // *Mon. Wea. Rev.*, 1983, vol. 111, p. 1537–1553.
15. *Ninomiya K.* Polar/comma-cloud lows over the Japan Sea and the northwestern Pacific in winter // *J. Meteorol. Soc. Japan*, 1989, vol. 67, p. 83–97.
16. *Noer G., Ovhed M.* Forecasting of polar lows in the Norwegian and the Barents Sea // *Proc. Ninth meeting of the EGS Polar Lows Working Group*, 2003, Cambridge, UK.
17. *Nordeng T.E.* The effect of vertical and slantwise convection on the simulation of polar lows // *Tellus*, 1987, vol. 39A, p. 354–375.
18. *Orvik K.A., Niiler P.* Major pathways of Atlantic water in the northern North Atlantic and Nordic Seas toward Arctic // *Geophys. Res. Lett.*, 2002, vol. 29(19), p. 1896–1899.
19. *Rabbe A.* Arctic instability lows // *Meteorologische annaler.*, 1975, vol. 6, no. 11, p. 304–329.
20. *Rasmussen E.A.* The Polar Low as an extratropical CISK disturbance // *Quart. J. R. Meteorol. Soc.*, 1979 vol. 105, p. 531–549.
21. *Rasmussen E.A., Turner J., Twitchell P.* Applications of new forms of satellite data in polar low research // *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1992(1), vol. 74, p. 1057–1073.
22. *Rasmussen E., Turner J.* Polar Lows. Mesoscale Weather Systems in the Polar Regions. Cambridge University Press, 2003. – 612 p.
23. *Shapiro M.A., Fedor L.S., Hampel T.* Research aircraft measurements of a polar low over the Norwegian Sea // *Tellus*, 1987, vol. 39A, p. 272–306.
24. *Suttie T.K.* Portrait of a polar low // *Weather*, 1970, vol. 25, p. 504–507.
25. *Twitchell P.F., Rasmussen E.A., Davidson K.L.* Polar and Arctic Lows, A. Deepak Publishing, 1989. – 421 p.
26. *Wilhelmsen K.* Climatological study of gale-producing polar lows near Norway // *Tellus*, 1985, vol. 37A, p. 451–459.
27. *Wu B., Wang J., Walsh J.* Possible Feedback of Winter Sea Ice in the Greenland and Barents Seas on the Local Atmosphere // *Mon. Wea. Rev.*, 2004, vol. 132, p. 1868–1876.

Работа выполнена в рамках мероприятия 1.2.2 Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг. (государственный контракт № П1570 от 10 сентября 2009 г.) по направлению «Мониторинг и прогнозирование состояния атмосферы и гидросферы».