

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРОГНОСТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ COSMO-RU ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СВОЙСТВ ПОЛЯРНЫХ ЦИКЛОНОВ: ЭПИЗОД 25–27 МАРТА 2014 ГОДА

М.А. Никитин¹, Г.С. Ривин¹, И.А. Розинкина¹, М.М. Чумаков²

*¹Гидрометеорологический научно-исследовательский центр
Российской Федерации;*

*²Научно-исследовательский институт природных газов
и газовых технологий
arhin@yandex.ru, Gdaly.rivin@mail.ru*

Введение

Одной из характерных особенностей циркуляции атмосферы в высоких широтах являются полярные циклоны. Согласно определению [11], полярным циклоном называется небольшой, но очень интенсивный циклон, сформировавшийся над морем к северу от основной бароклинной зоны (например, полярного фронта). Горизонтальный масштаб полярных циклонов варьируется от 200 до 1000 км, а скорость ветра у поверхности Земли превышает 15 м/с [6], в отдельных случаях достигая 35 м/с [4]. Характерными особенностями полярных циклонов являются их короткий период жизни, не превышающий 2–3 суток, и высокая скорость перемещения (40 км/ч) [1, 2].

Длительная дискуссия по разграничению терминов «мезомасштабный циклон», или «мезоциклон», и «полярный циклон» была проведена членами Европейской рабочей группы по полярным циклонам [8]. Фактически они пришли к мнению, что термин мезоциклон следует применять для любого циклона, расположенного ближе к полюсу, чем основной полярный фронт, и имеющий масштаб, меньший 2000 км. Полярным циклоном они предложили

называть подтип мезоциклонов, расположенный (1) над морской поверхностью и (2) с приповерхностным ветром, превышающим 15 м/с. Заметим, что размеры проанализированного 491 полярного циклона над Северо-Европейским бассейном и Карским морем по данным за 1981–2002 гг. принадлежат интервалу 50–700 км [1]. Таким образом, ограничение снизу в 200 км в определении [11], снятое в определении [8], действительно является лишним.

В то же время в определении, приведенном в [8], верхняя граница размера полярного циклона как подтипа мезоциклона не задана. В то же время, согласно данным [1], приведенная для мезоциклона величина 2000 км (по определению справедливая для любого мезомасштабного процесса) завышена для полярного циклона.

Исходя из этого, более точно полярным циклоном следует называть подтип мезоциклонов, расположенный (1) над морской поверхностью ближе к полюсу (как Северному, так и Южному) от основной бароклинной зоны, (2) с приповерхностным ветром, превышающим 15 м/с, и (3) имеющий размер, меньший 1000 км.

Механизмов образования полярных циклонов несколько [2, 3, 9, 11]. Один из основных – термическая конвекция при перемещении холодной воздушной массы с холодной поверхности ледяного покрова на относительно теплую поверхность морской воды. Холодный воздух быстро нагревается и насыщается влагой, что приводит к вертикальной неустойчивости и развитию конвекции. Важными механизмами могут быть бароклинная и баротропная неустойчивости. Одним из основных практических прогностических признаков полярного циклона является высокая (более 43 °С) разность температур между подстилающей поверхностью и изобарической поверхностью 500 гПа. Также в качестве важного прогностического признака выделяют высокие (больше 2 PVU) значения потенциального вихря на высоте 500 гПа [7].

Постановка задачи и методика проведения численных экспериментов

Наиболее достоверная информация о значениях метеорологических параметров может быть получена на основе данных

наблюдений ИСЗ, самолетов, судов и буев [6]. Однако построить комплексную картину образования достаточно удобно с привлечением гидродинамического моделирования с высоким пространственным разрешением.

Основная цель данной работы – на основе высокодетального (с тремя шагами сетки 13,2, 6,6 и 2,2 км) рассмотреть ключевые факторы, определяющие зарождение и развитие полярного циклона, наблюдавшегося 25–27 марта 2014 года на акватории Баренцева и Карского морей. В числе этих факторов были рассмотрены наличие и сплоченность морского льда, а также существование струйного течения.

Для проведения численных экспериментов по моделированию полярных циклонов использовалась региональная негидростатическая система прогноза погоды COSMO-Ru [5]. Используемая в системе модель COSMO разрабатывается с 1998 года в рамках Консорциума по мелкомасштабному моделированию (COnsortium for Small-scale MOdelling) метеорологическими службами нескольких стран: вначале Германии, а затем Швейцарии, Италии, Греции, Польши, Румынии и России (порядок соответствует времени вступления в Консорциум).

В настоящее время система COSMO-Ru является базовой в оперативной практике Росгидромета для проведения оперативных расчетов по разным доменам с шагами сетки от 13,2 до 1,1 км.

Для выявления случаев полярных циклонов использовались оперативные прогнозы для модели COSMO-RuENA (Europe – North Asia, Европа – Северная Азия) [5]. Шаг сетки этой модели составляет 13,2 км, область интегрирования покрывает всю территорию Европы, значительную часть континентальной территории Азии (за исключением Индии, регионов южного Китая и юго-восточной Азии), часть акваторий Атлантического, Тихого и Северного Ледовитого океанов, включая район Северного полюса. Расчеты ведутся на сетке со сдвинутыми полюсами (подробнее в [5] и приведенных в ней ссылках на документацию модели COSMO).

Основными формальными критериями выявления полярных циклонов над акваториями Баренцева и Карского морей были

линейные размеры наблюдаемых барических депрессий и высокие значения скорости ветра на высоте 10 м, превышающие 15 м/с.

Рассмотренный в наших численных экспериментах полярный циклон образовался в 18–21 ч ВСВ 25 марта 2014 года к юго-востоку от архипелага Шпицберген, пересек Баренцево море в юго-восточном направлении, прошел над проливом Югорский Шар на акваторию Карского моря, затем стационарировал над акваторией Байдарацкой губы и в районе 12 ч ВСВ 27 марта полностью заполнился (рис. 1). По данным модели COSMO-RuENA, скорость ветра при прохождении полярного циклона достигала 25 м/с.

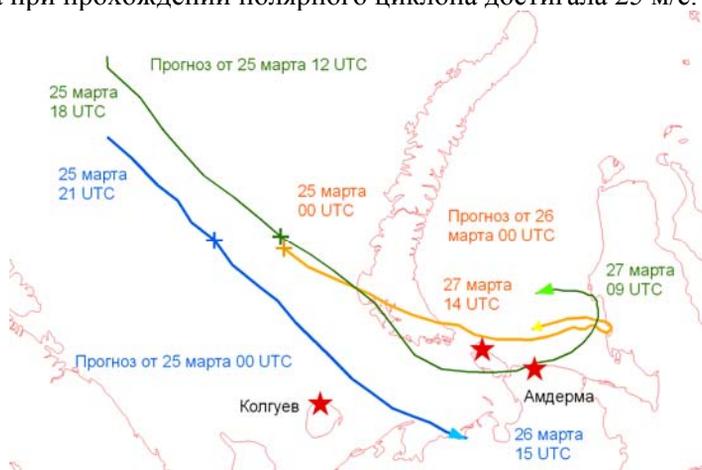


Рис. 1. Положение шторм-треков исследуемого полярного циклона при прогнозах с различной заблаговременностью: в начале и конце каждого шторм-трека указано время зарождения и время заполнения полярного циклона соответственно (модель COSMO-Ru с шагом сетки 2,2 км).

Результаты моделирования сравнивались с данными спутниковых снимков, полученных с помощью спектрорадиометра MODIS (Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer), при этом полярный циклон был хорошо заметен в поле облачности [4]. Кроме того, в период прохождения этого полярного циклона наблюдалось усиление скорости ветра на метеостанциях Амдерма, мыс Болванский и остров Колгуев. Таким образом было

установлено, что численная модель атмосферы COSMO-Ru способна реалистично воспроизводить динамику и эволюцию полярных циклонов.

Для более детального моделирования данного полярного циклона использовался метод вложенных сеток. Результаты моделирования на сетке с шагом 13,2 км использовались в качестве начальных и граничных условий для более мелкой сетки с шагом 6,6 км, а они, в свою очередь, для моделирования на сетке с шагом 2,2 км. Последний домен, названный BKS (Barents-Kara Seas), охватывает все Баренцево море, часть акваторий Карского и Гренландского морей и прилегающее побережье. Его размер составляет 2200×2420 км. Метод позволяет более детально изучить структуру и эволюцию полярного циклона, уточнить его метеорологические характеристики. Например, при моделировании в области с шагом сетки 2,2 км скорость ветра в моделируемом полярном циклоне в отдельные моменты времени превышала 30 м/с (рис. 2), в то время как при моделировании на сетке с шагом 13,2 км скорость ветра не достигала 27,5 м/с.

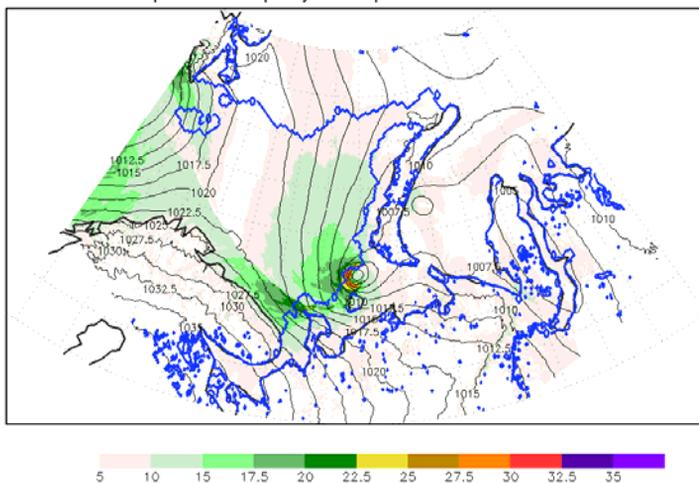


Рис. 2. Скорость ветра на высоте 10 м и давление, приведенное к уровню моря, прогноз от 00 ч ВСУ 25 марта 2014 года на 32 часа по модели COSMO-RuBKS (шаг сетки 2,2 км).

Синими изолиниями обозначена толщина льда 0 см.

Сравнение результатов моделирования с наблюдениями на метеорологических станциях показало, что модель COSMO-RuBKS недооценивает наблюдавшееся увеличение скорости ветра. Например, в 9.00 ч ВСВ 26 марта 2014 года на метеорологической станции остров Колгуев скорость ветра по данным наблюдения составила 19 м/с, а по данным моделирования она равнялась 13,1 м/с. Для порывов ветра эти значения составляли 23 и 17,1 м/с соответственно.

Анализ влияния наличия морского льда на развитие полярного циклона

Модель COSMO обладает большим набором параметров, позволяющих варьировать описание физических процессов. В частности, в модели можно отключить параметризацию морского льда, которая воспроизводит процессы нарастания и таяния льда. При отключенной параметризации в качестве температуры поверхности будет использоваться температура открытой воды с минимальным значением -2°C . В рассматриваемом случае в отсутствии льда температура поверхности воды превышала температуру поверхности льда (если бы он существовал в модели) на $10\text{--}20^{\circ}\text{C}$.

В данном эксперименте прогноз стартовал с начальными данными за 12 ч ВСВ 25 марта 2014 года. В первые часы жизни полярные циклоны в обоих экспериментах (с наличием и отсутствием морского льда) развивались одинаково. Изменения начали проявляться примерно с двадцатого часа прогноза, когда полярный циклон вышел на акваторию Карского моря. В эксперименте с «отключенным» льдом по сравнению с контрольным экспериментом скорость ветра в циклоне повысилась на $2,5\text{--}5$ м/с, давление понизилось на 5 гПа, области с сильным ветром увеличились. Начиная с 18 ч ВСВ 26 марта (тридцатый час прогноза) начались существенные расхождения в траекториях полярных циклонов (рис. 3). Если в контрольном эксперименте циклон двигался к западному побережью полуострова Ямал и стационарировал над устьем Байдарацкой губы, где и заполнился, то в эксперименте с «отключенным» льдом полярный циклон сначала

двинулся вглубь Байдарацкой губы по свободной ото льда морской поверхности, а потом, после «соприкосновения» с материком, повернул обратно. Можно предположить, что подобная траектория обуславливалась наличием относительно теплой воды на подстилающей поверхности.

Таким образом, отсутствие льда в численных экспериментах привело к углублению циклона и изменению его траектории.

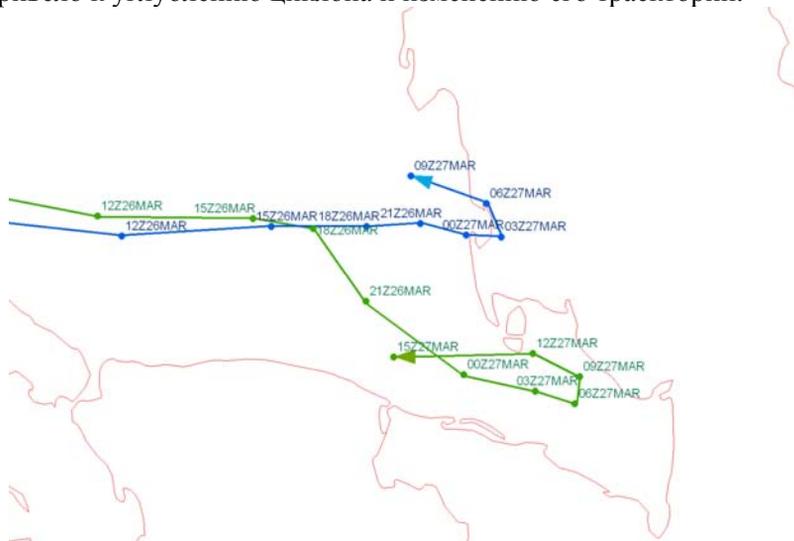


Рис. 3. Траектории движения центра полярного циклона в эксперименте с отключенной параметризацией льда (зеленый) и в контрольном эксперименте (синий), прогноз от 12 ч ВСВ 2014 г. по модели COSMO-RuBKS.

Анализ влияния сплоченности льда на развитие полярного циклона

В действительности Карское и восточная часть Баренцева морей были покрыты ледяным покровом, важной характеристикой которого является его сплоченность. Во втором эксперименте изучалось влияние этой характеристики на сформировавшийся полярный циклон.

Сплоченность оказывает важное влияние на состояние атмосферы над льдом. Наличие полыней и разводий приводит к значительным восходящим потокам явного и скрытого тепла, что оказывает сильное влияние на погоду прилегающих территорий [10], в том числе – и на развитие полярных циклонов.

В параметризации морского льда, используемой в модели COSMO, рассчитываются температура и толщина льда, но не его сплоченность. Поэтому для отображения данного эффекта требуется на месте полыней задавать ячейки, свободные ото льда.

Месторасположение крупных полыней определялось по данным спетрорадиометра MODIS, установленного на спутнике Terra. MODIS получает данные по множеству каналов в различных спектральных диапазонах. Границы полыней выделялись вручную по композитному снимку за 25 марта 2014 года. Для целей исследования ледяного покрова при генерации композитного снимка, использующего RGB-представление (красный-зеленый-голубой), на место первого (RED) канала подставлялись данные с детекторов MODIS, измеряющих излучение в диапазоне длин волн 459–479 нм, на место второго (GREEN) – 1628–1652 нм, третьего (BLUE) – 2105–2155 нм. На сгенерированных таким образом снимках регионы, покрытые льдом, будут окрашены в оттенки красного цвета, поскольку лед обладает большой отражательной способностью в синей части спектра видимого света, а его излучение в инфракрасной области (диапазоны 6 и 7) весьма мало. Облака хорошо отражают во всех этих диапазонах и, следовательно, на снимке будут иметь белую окраску. Морская вода будет выглядеть на снимке очень темной, почти черной, поскольку хорошо поглощает во всех используемых диапазонах. Таким образом, использование подобного композита позволяет надежно идентифицировать структуру облачности, а также участки акватории с ледяным покровом и крупные полыньи с линейными размерами 4–6 км и более (два-три узла сетки домена BKS).

Однако для корректного учета сплоченности необходимо учитывать не только крупные, но и мелкие полыньи. При этом трудозатраты, необходимые для выявления более мелких полыней,

резко возрастают; кроме того, этот метод не всегда применим из-за наличия облачного покрова. Поэтому при проведении численного эксперимента с помощью ручного анализа спутниковых изображений задавались только крупные полыньи.

Для учета мелких полыней использовался иной метод. Сплоченность льда на акватории Карского моря была принята равной 80 %. 20 % модельных ячеек в этой области задавались свободными ото льда. Их местоположение определялось с помощью генератора случайных чисел. Подобный метод позволяет легко варьировать величину сплоченности льда.

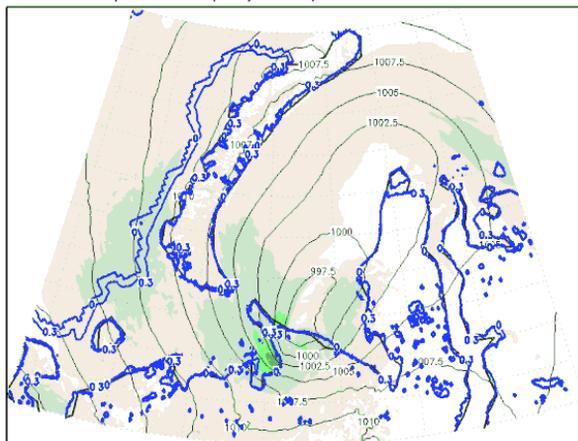
В данном эксперименте прогноз стартовал от 12 ч ВСВ 25 марта 2014 года, первая замкнутая изобара (проведенная через 2,5 гПа) в обоих вариантах (контрольном и в случае задания полыней) появилась в 19 ч ВСВ, на седьмой час прогноза. На ледяной покров, располагавшийся в восточной части Баренцева моря, полярный циклон вышел в 6 ч ВСВ 26 марта, на восемнадцатый час прогноза, и в дальнейшем перемещался исключительно надо льдом. При этом в обоих экспериментах полярные циклоны двигались по одной и той же траектории. Но в случае уменьшенной сплоченности льда (рис. 4) в полярном циклоне давление в центре было ниже, а максимальная скорость ветра – выше (свыше 17,5 м/с, в контрольном эксперименте это значение не было достигнуто).

Таким образом, при уменьшении сплоченности льда в численном эксперименте циклон углубился и скорость ветра в нем усилилась.

Анализ влияния наличия морского льда на зарождение полярного циклона

Одним из механизмов формирования полярных циклонов является адвекция холодного воздуха на теплую подстилающую поверхность. В рассматриваемом случае циклон начал формироваться над кромкой льда в районе Шпицбергена (именно там, согласно прогнозу от 12 ч ВСВ 25 марта, в 15 ч ВСВ образовалась первая ложбина). Возникает вопрос: насколько чувствителен этот процесс к изменению положения кромки льда?

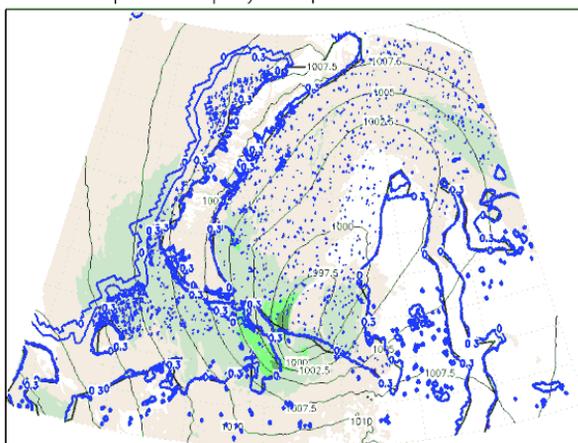
Скорость ветра у поверхности на 26 часа



GAGS: COLA/IGES

5 10 15 17.5 20 22.5 25 27.5 30 32.5 35 2015-02-04-13:45

Скорость ветра у поверхности на 26 часа



GAGS: COLA/IGES

5 10 15 17.5 20 22.5 25 27.5 30 32.5 35 2015-02-06-08:01

Рис. 4. Скорость ветра на высоте 10 м и давление, приведенное к уровню моря, прогноз от 12 ч ВСВ 25 марта 2014 г. на 26 часов по модели COSMO-RuBKS: Справа – эксперимент со сплоченностью льда, равной 80 % (вверху); контрольный эксперимент (внизу). Синими изолиниями обозначена толщина льда 0 и 30 см.

Было предпринято 2 группы численных экспериментов А и Б: в первой ледяной покров искусственно уничтожался, во второй группе – наоборот, весь домен покрывался льдом. Таким образом, в обоих случаях уничтожалась область градиентов приводной температуры воздуха, однако условия атмосферной неустойчивости существенно отличались друг от друга.

А) *Искусственное отсутствие льда.* В численных экспериментах контрольный прогноз считался по полной версии, с включенной параметризацией льда и наличием льда в начальных данных, а для экспериментального прогноза лед как в начальных данных, так и в параметризации отсутствовал.

При старте прогнозов от 12 ч ВСВ 25 марта первая замкнутая изобара появляется на седьмой час прогноза, и за столь короткий промежуток времени изменение положения ледяного покрова в начальных данных для интегрирования никак не сказалось на формировании полярного циклона.

При прогнозах от 00 ч ВСВ 25 марта (на 12 часов раньше) существенных различий между экспериментом «без льда» и контрольным экспериментом (для доменов с шагом сетки 13,2, 6,6 и 2,2 км) в полях приземного ветра и давления на начальном этапе формирования полярного циклона не выявлено. На более поздних этапах, когда циклон выходит на покрытую льдом акваторию Печорского моря, в эксперименте «без льда» наблюдаются более высокие значения скорости ветра (свыше 25 м/с на 35-й час прогноза, в контрольном эксперименте это значение не было достигнуто). В отличие от прогноза, стартовавшего в 12 ч ВСВ, в этих экспериментах циклон не менял свою траекторию.

В эксперименте «без льда» существенно выросла температура приводного воздуха на акваториях, в реальности занятых льдом. Вместо $-16 - -20$ °С в контрольном эксперименте температура в эксперименте «без льда» к двадцать седьмому часу прогноза повысилась до $-8 - -4$ °С. На акваториях, прилегающих к кромке льда, отмечено аналогичное повышение температуры воздуха.

Можно предположить, что за время, прошедшее с начала прогноза, атмосфера не успела в достаточной степени прогреться, поэтому для изучения влияния ледяного покрова на зарождение полярного циклона необходим прогноз с более ранней стартовой даты.

В качестве стартовой даты прогноза было выбрано 12 ч ВСВ 24 марта, более чем за сутки до формирования полярного циклона. Модель COSMO-RuENA (шаг сетки 13,2 км) сформировала прогноз на 24 часа, атмосфера в модели несколько «разогревалась» в течение всего этого срока. При этом прогрев не ограничивался приземным слоем. Если в контрольном эксперименте температура воздуха на H925 к востоку и юго-востоку от Шпицбергена была ниже -20°C , то в эксперименте «безо льда» она была выше -15°C . Потом, уже с относительно «прогретой» атмосферы, после интерполяции данных с домена ENA в начальные и граничные условия вложенных доменов, по сроку 12 ч ВСВ 25 марта стартовала модель COSMO-RuBKS.

Однако указанных изменений в начальных полях оказалось недостаточно: полярный циклон сформировался и в данных условиях. Так как при прогнозе от 00 ч ВСВ 24 марта полярный циклон не формируется, отключения параметризации льда для более ранних сроков не проводилось.

Таким образом показано, что в данных экспериментах отсутствие поля морского льда в начальных данных не повлияло на зарождение полярного циклона. По-видимому, для выявления взаимосвязей между этим процессом и состоянием ледяного покрова необходимы дальнейшие эксперименты.

Б) *Искусственное покрытие льдом всего домена.* В этом эксперименте предполагалось, что море покрыто льдом толщиной 0,5 м и с температурой 268 К (около -5°C). Таким образом, потоки явного и скрытого тепла резко уменьшались.

В качестве стартовой даты прогноза было выбрано 00 ч ВСВ 25 марта (примерно за 21 час до формирования полноценного полярного циклона), для прогноза использовался метод вложенных сеток с шагом сетки 13,2, 6,6 и 2,2 км. В эксперименте «море полностью покрыто льдом» в 21 ч ВСВ полярный циклон не сформировался. Однако позже, в 04 ч ВСВ 26 марта на траектории прохождения полярного циклона образовалась единичная замкнутая изобара (изобары проводились через 2,5 гПа). Также модель воспроизвела повышение скорости ветра до 15 м/с, а местами – до 17,5 м/с.

Таким образом, из-за недостатка энергии, которая в контрольном эксперименте поступала с открытой водной поверхности, полярный циклон сформировался в крайне ослабленном варианте.

На основе анализа выполненных экспериментов можно предположить, что триггером, «спусковым крючком» рождения полярного циклона, послужила вертикальная термодинамическая структура атмосферы в данном регионе. Она обладает определенной инерцией и продолжает действовать, несмотря на резкое изменение характеристик подстилающей поверхности в начальных данных численных экспериментов. Однако определяющим фактором дальнейшего развития барического образования является наличие открытой водной поверхности.

Связь полярного циклона со струйным течением

В ходе изучения результатов численных экспериментов подтвердилось, что полярный циклон расположен в нижней части тропосферы. На изобарической поверхности Н700 наблюдается ложбина, но уже нет замкнутых изогипс (изогипсы проведены через два геопотенциальных декаметра). На изобарической поверхности Н500 отсутствует даже ложбина.

Однако при анализе структуры полей ветра в данном регионе выявлена связь с процессами в верхней тропосфере.

На рис. 5 изображен вертикальный разрез атмосферы вдоль направления движения полярного циклона между изобарическими поверхностями 1000 и 100 гПа (прогноз от 12 ч ВСВ 25 марта). Видно, что скорость ветра у поверхности Земли достигает 30 м/с. Также очевидна связь областей со скоростями ветра 30–32,5 м/с от 1000 до 500 гПа с максимумом усиления ветра в струйном течении. На высоте 300 гПа скорость ветра превышает 70 м/с.

На рис. 6 изображены карты скорости ветра на высоте 300 гПа. Видно, что в 00 ч ВСВ, в момент начала прогноза, скорость ветра в струе не превышает 60 м/с. Перед началом формирования полярного циклона она превысила 60 м/с, при появлении первой замкнутой изобары превысила 65 м/с, а в момент максимального развития циклона превышала 72,5 м/с. По мере заполнения полярного циклона скорость струи снижалась.

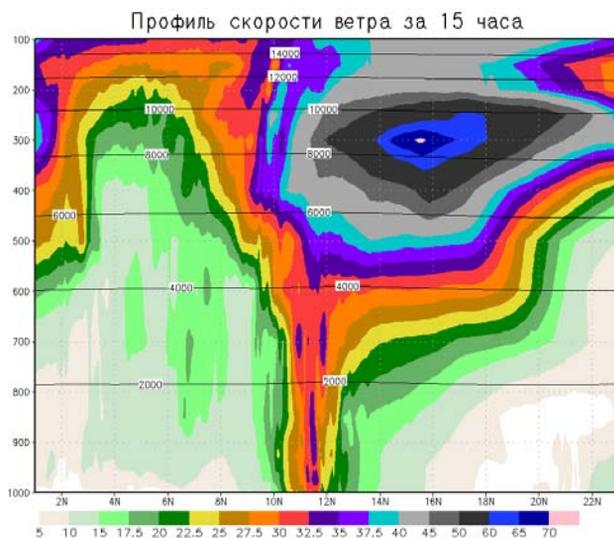


Рис. 5. Скорость ветра и геопотенциальная высота, вертикальный разрез атмосферы вдоль направления движения полярного циклона между изобарическими поверхностями 1000 и 100 гПа, прогноз от 12 ч ВСВ 25 марта 2014 г. на 15 часов по модели COSMO-RuBKS.

При этом основной интерес представляет даже не то, что формирование полярного циклона происходит неподалеку от оси струйного течения, а то, что при возникновении полярного циклона наблюдается значительное усиление скорости ветра на струйном течении вблизи положения этого циклона.

Поскольку струйные течения соответствуют областям высокой бароклинности в нижележащих слоях атмосферы, то приведенные результаты численных экспериментов подтверждают связь данного циклона с бароклинностью.

Для того, чтобы оценить влияние струйного течения на полярный циклон, был проведен следующий численный эксперимент. Скорость ветра между изобарическими поверхностями H500 и H300 была искусственно ограничена 15 м/с.

Чтобы избежать неустойчивости модели, ограничение вводилось следующим образом. На каждом шаге модели

проверялся модуль скорости ветра. Если его значение на уровнях, лежащих между H500 и H300, превышало 15 м/с, то его компоненты умножались на 0,9. Этим удалось добиться относительно плавного снижения скорости ветра и подстройки остальных модельных полей под изменившиеся условия. Прогноз стартовал с 00 ч ВСВ 25 марта в домене VKS, шаг сетки 2,2 км.

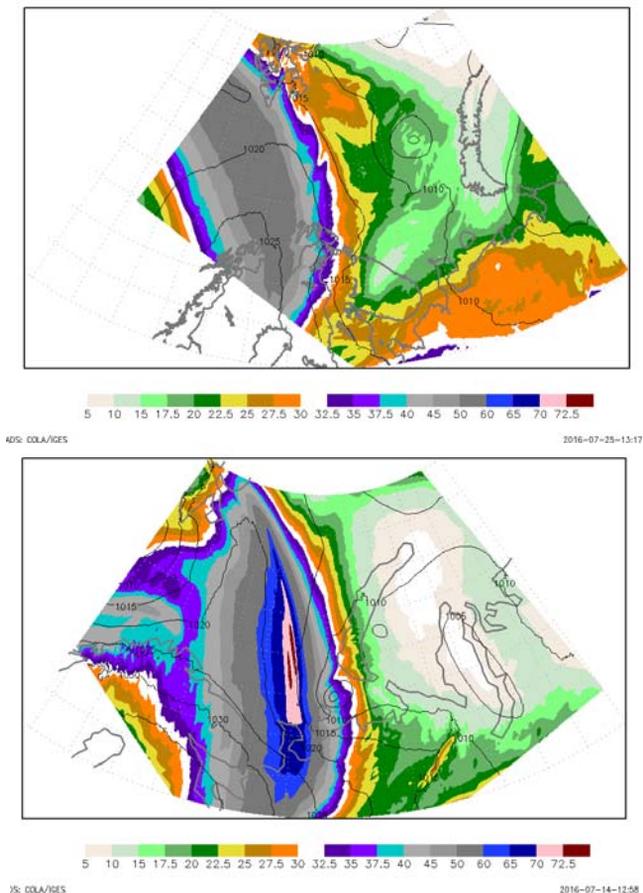


Рис. 6. Скорость ветра на изобарической поверхности 300 гПа и давление, приведенное к уровню моря, прогноз от 00 ч ВСВ 25 марта 2014 г. по модели COSMO-RuVKS (сверху – на 11 ч, снизу – на 32 ч).

В результате полярный циклон сформировался в весьма ослабленном состоянии, скорость ветра в нем не превышала 20 м/с (рис. 7). Полярный циклон существенно изменил свою траекторию, выйдя к западному побережью Новой Земли в районе полуострова Гусиная Земля и залива Моллера. Также в этом эксперименте отсутствует сгущение изотерм на изобарической поверхности H500.

В следующем эксперименте наряду с ограничением скорости ветра на высотах морская поверхность была полностью покрыта льдом. В этом случае полярный циклон не сформировался.

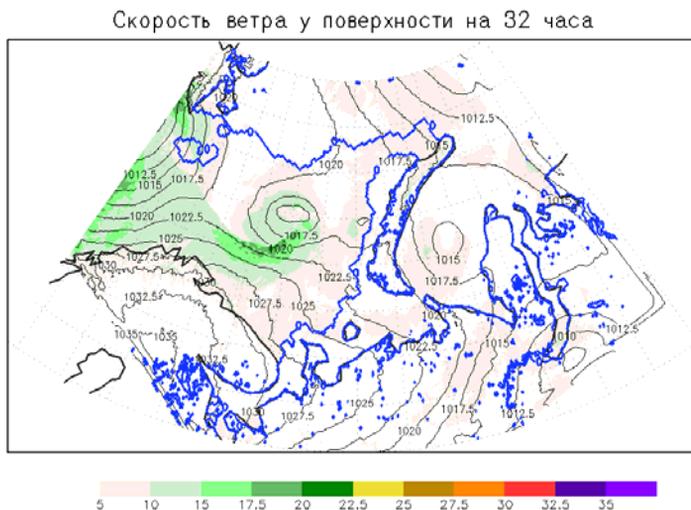


Рис. 7. Скорость ветра на высоте 10 м и давление, приведенное к уровню моря, прогноз от 00 ч ВСВ 25 марта 2014 г. на 32 часа по модели COSMO-Ru BKS (шаг сетки 2,2 км). Скорость струйного течения на высотах 500–300 гПа ограничена 15 м/с. Синими изолиниями обозначена толщина льда 0 см.

Таким образом, на формирование полярного циклона, наблюдавшегося 25–27 марта 2014 года, ключевую роль оказывало два фактора: потоки тепла с подстилающей поверхности, занятой открытой водой, и наличие струйного течения с осью струи на высоте 300 гПа.

Заключение

В ходе проделанной работы были получены следующие результаты.

1. С помощью гидродинамической негидростатической системы краткосрочного прогноза погоды COSMO-Ru проведен ряд численных экспериментов по изучению особенностей развития полярного циклона, наблюдавшегося 25–27 марта 2014 года в акваториях Баренцева и Карского морей.

2. Показано, что развитие сформировавшегося ранее полярного циклона существенно зависят от состояния подстилающей поверхности. При уменьшении сплоченности льда циклон усиливается, а при полном освобождении поверхности морей ото льда – усиливается и меняет траекторию, смещаясь в сторону открытой водной поверхности.

3. В выполненных численных экспериментах для рассматриваемого случая процесс зарождения полярного циклона обладал низкой чувствительностью к изменению положения кромки льда и наличию ледяного покрова в начальных полях модели. Однако при полном покрытии поверхности моря льдом циклон существенно ослабляется, но не исчезает до конца.

4. Показано, что одним из факторов, влияющих на эволюцию полярного циклона, является наличие струйного течения с осью струи на высоте 300 гПа. При ослаблении и отсутствии струйного течения в численных экспериментах циклон ослабляется и меняет траекторию. Кроме того, в этих условиях при полностью покрытой льдом поверхности моря полярный циклон не образуется.

Авторы выражают благодарность сотрудникам Гидрометцентра России и ГВЦ Росгидромета за помощь и консультации по оптимальной организации численных экспериментов.

Исследование выполнено при поддержке грантов Российского научного фонда (проект №14-37-00053) и Российского фонда фундаментальных исследований (проект №15-55-20003 Норв_а).

Список использованных источников

1. Луценко Э.И., Лагун В.Е. Полярные мезомасштабные циклонические вихри в атмосфере Арктики: Справочное пособие. – СПб.: ААНИИ, 2010. – 95 с.
2. Луценко Э.И., Лагун В.Е. Полярные мезомасштабные циклоны в атмосфере над Баренцевым и Карским морями // Проблемы Арктики и Антарктики. – 2013. – № 2 (96). – С. 76–89. – [http://www.aari.ru/misc/publicat/paa/ПAA-96/ПAA96-07-\(76-89\).pdf](http://www.aari.ru/misc/publicat/paa/ПAA-96/ПAA96-07-(76-89).pdf).
3. Мохов И.И., Акперов М.Г., Лагун В.Е., Луценко Э.И. Интенсивные арктические мезоциклоны // Известия РАН. ФАО. – 2007. – Т. 43, № 3. – С. 291–297.
4. Никитин М.А., Ривин Г.С., Розинкина И.А., Чумаков М.М. Идентификация полярных циклонов над акваторией Карского моря с помощью гидродинамического моделирования // Вести газовой науки. – 2015, № 2. – С. 106–112.
5. Ривин Г.С., Розинкина И.А., Вильфанд Р.М., Алферов Д.Ю. и др. Система COSMO-Ru негидростатического мезомасштабного краткосрочного прогноза погоды Гидрометцентра России: второй этап реализации и развития // Метеорология и гидрология. – 2015. – № 6. – С. 58–70.
6. Brummer B., Muller G. A Polar low pair over the Norwegian Sea // Mon. Wea. Rev. – 2009. – Vol. 137. – P. 2559–2575.
7. Gunnar N., Øyvind S., Trond L., Yvonne G. A climatological study of polar lows in the Nordic Seas // Q. J. R. Meteorol. Soc. – 2011. – Vol. 137, No. 660. – P. 1762–1772.
8. Günther H., Øyvind S. Workshop on polar lows // BAMS. – 2013. – Vol. 94, No. 9. – P. ES123–ES126.
9. Iversen T. Polar lows – a challenge for predicting extreme polar weather // ECMWF-WWRP/THORPEX Workshop on polar prediction, 24–27 June 2013. – 14 p. – <http://www.ecmwf.int/sites/default/files/elibrary/2013/13950-polar-lows-challenge-predicting-extreme-polar-weather.pdf>
10. Marqç S., Weiss J. Influence of sea ice lead-width distribution on turbulent heat transfer between the ocean and the atmosphere // The Cryosphere. – 2012. – Vol. 6. – P. 143–156. – doi:10.5194/tc-6-143-2012.
11. Polar Lows: Mesoscale Weather Systems in the Polar Regions // Eds. J. Turner, – Cambridge University Press, 2003. – 612 p.

Поступила в издательство 9.08.2016 г.