

УДК 551.515.6(211)

АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ МЕХАНИЗМОВ ФОРМИРОВАНИЯ «ВЗРЫВНЫХ» ПОЛЯРНЫХ ЦИКЛОНОВ

*Ю.В. Ефимова, К.Ю. Булгаков, Н.В. Федосеева,
Л.О. Неелова, А.И. Угрюмов, И.В. Лаврова*

Российский государственный гидрометеорологический университет

Описываются основные характеристики полярных циклонов, анализируются условия их возникновения. По архивным данным выявлены районы, с наибольшей повторяемостью полярных циклонов. Проводится комплексный анализ синоптических, спутниковых данных и результатов математического моделирования на основе модели WRF. Показано, что для прогноза полярных циклонов необходимо использовать весь комплекс параметров: адвекцию температуры в тропосфере, спиральность воздушных потоков, динамическую неустойчивость и кинетическую энергию потоков.

Ключевые слова: полярные циклоны, спутниковые данные, синоптический анализ, математическое моделирование.

ANALYSIS OF IMPORTANT MECHANISMS OF POLAR CYCLONES GENERATION

*Yu.V. Efimova, K. Yu. Bulgakov, N.V. Fedoseeva,
L.O. Neelova, A.I. Ugriumov, I.V. Lavrova*

Russian State Hydrometeorology University

The main features of polar cyclones are considered, conditions of polar cyclones generation are analysed. According to archival data, areas with the highest frequency of polar cyclones have been identified. A complex analysis of synoptic, satellite data and results of mathematical modeling based on the WRF model is carried out. It is shown that for the forecast of polar cyclones it is necessary to use the whole complex of parameters: thermal advection in troposphere, spiral-wide motions of the air streams, dynamic non-steady and kinetic energy of the flow.

Keywords: polar cyclones, satellite data, synoptic analysis, mathematical modeling.

Введение

В последние годы большое внимание метеорологов привлекают так называемые взрывные, или штормовые полярные циклоны, которые возникают за очень короткое время и по своей интенсивности сходны с тропическими ураганами. С ними связаны резкие ухудшения погодных условий, штормовые ветры.

Штормовые циклоны в российском секторе Северного Ледовитого океана наблюдаются обычно в период с августа по апрель. Основная сложность их прогнозирования заключается в отсутствии регулярных метеорологических судовых наблюдений в очагах их формирования. На основании данных обычных наблюдений

их возникновение отследить практически невозможно. Размеры взрывных полярных циклонов невелики по сравнению с размерами крупномасштабных барических образований: их диаметр обычно не превышает 1000 км и в среднем составляет 200—600 км [3]. Срок жизни таких барических образований составляет от нескольких часов до двух суток. В результате «взрывного» характера и небольшого размера полярные мезоциклоны (ПМЦ) достаточно редко фиксируются на синоптических картах в виде области замкнутых изобар.

Климатические условия арктического побережья и акватории окраинных морей в российском секторе Северного Ледовитого океана характеризуются большими температурными контрастами в приводном слое и интенсивной атмосферной циркуляцией, что создает благоприятные условия для формирования штормовых мезовихрей [1]. Особый интерес вызывают процессы циклогенеза в осенний период, в сентябре — октябре, когда происходит процесс льдообразования, который может приводить к усилению контрастов температуры в приводном слое. В процессе развития полярных мезовихрей могут быть задействованы различные динамические и тепловые механизмы, анализ которых и является темой данной работы.

Привлеченные данные, методика и районы исследования

Для анализа условий формирования и эволюции ПМЦ был привлечен архив спутниковых данных [4] о наиболее интенсивных осенних мезовихрях за период с 2000 по 2012 г. в различных секторах Арктики.

В ходе научно-исследовательской работы был проведен комплексный анализ 22 наиболее интенсивных полярных циклонов и были отработаны подходы к методологии прогнозирования очага формирования ПМЦ.

Для анализа условий возникновения и эволюции каждого из выделенных штормовых мезоциклонов был привлечен архив приземных и высотных барических карт за период с 1 января 2000 г. по 30 ноября 2012 г. Информация получена с сервера базы данных для АРМС (автоматическая радиометеорологическая станция) «Погода» НПК «Оскар». Прием данных на сервер осуществляется по выделенному каналу связи из ФГБУ «Санкт-Петербургский центр по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды с региональными функциями». В ходе анализа синоптической ситуации, сопутствующей возникновению и заполнению полярных циклонов, рассматривался временной диапазон, начинающийся за сутки до обнаружения циклона и включающий полный цикл его развития до заполнения. Обзор синоптической ситуации, сопутствующей возникновению полярного мезоциклона, составлялся с использованием всего спектра карт барической топографии.

Одновременно проводился расчет циркуляции и связанных с ней параметров состояния атмосферы по численной модели WRF. Диагноз основных движущих механизмов, связанных с формированием полярных циклонов, проводился с учетом энергетических характеристик атмосферы.

В процессе исследования механизма формирования полярных мезоциклонов были рассмотрены метеорологические параметры, которые могут являться

индикаторами активного циклогенеза [2]. К ним были отнесены: адвективные изменения температуры в нижней и средней тропосфере, динамическая (бароклинная) неустойчивость и спиралевидность атмосферных потоков, кинетическая энергия движений в средней тропосфере в районе циклогенеза, ротор ветра (вихревая составляющая скорости ветра, при циклонической циркуляции имеет положительную проекцию), энергия фазовых переходов.

В процессе работы были выделены наиболее благоприятные для возникновения штормовых циклонов районы, которые показаны на рис. 1.

В течение рассмотренного периода полярные циклоны наиболее часто фиксировались на границе Баренцева и Карского морей, над Восточно-Сибирским морем и в центральной части моря Лаптевых.

Большинство из рассмотренных барических минимумов формировались на границе Баренцева и Карского морей (41 % случаев). Высокая повторяемость штормовых циклонов в данном секторе, очевидно, связана с климатическими особенностями Баренцева и Карского морей. Теплое Нордкапское течение на юго-западе Баренцева моря и частый вынос тепла атлантическими циклонами делают Баренцево море относительно теплым по сравнению с Карским морем. Часто штормовые циклоны возникают в районе Новой Земли, где основной климатической особенностью является схождение воздушных потоков, называемых «Новоземельская бора». На острове существует горный хребет, вытянутый с севера на юг, и бора отмечается на западном побережье с ветрами северо-восточного направления, а на восточном — с ветрами северо-западного направления.

Синоптические ситуации, сопутствующие образованию штормовых циклонов (37 % случаев) над Восточно-Сибирским морем в осенний период, достаточно сложны. В основном в исследуемом районе наблюдается мощная адвекция тепла с континента, под центральной частью начального возмущения фиксируется гребень тепла, над западной частью Восточно-Сибирского моря — ложбина холода. Наиболее часто центр зарождающегося циклона находится к северу от Чаунской губы и в дальнейшем может смещаться на континент.

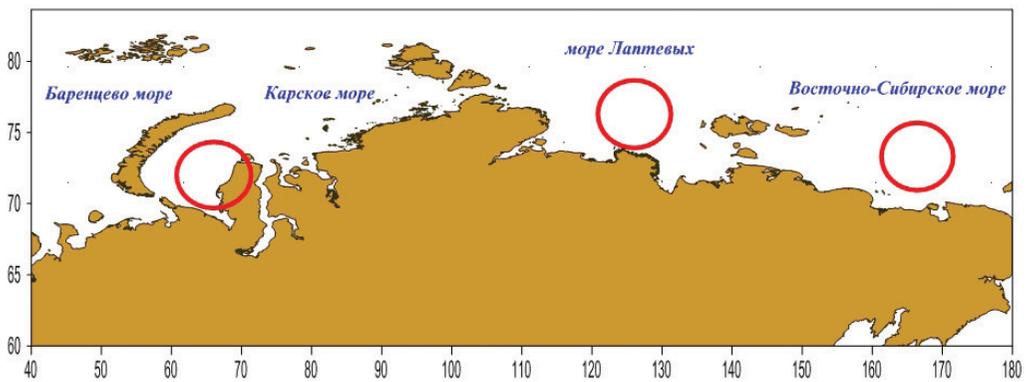


Рис. 1. Области формирования штормовых циклонов в осенний период.

Синоптические процессы в периоды образования ПМЦ

Необходимо отметить, что в большинстве случаев (71 %) очаг формирования штормового мезоциклона фиксировался в малоградиентном поле заполняющегося циклона (материнский циклон). По условиям формирования ПМЦ можно разделить на образующиеся в малоградиентном поле пониженного давления, в малоградиентном поле повышенного давления и в областях высоких градиентов давления. Полярные циклоны, возникающие в областях повышенного давления, обычно бывают неглубокими (давление в центре выше 1005 гПа).

В комплексном анализе адвективных изменений температуры воздуха в тропосфере использовались карты относительной топографии, абсолютной топографии на уровне 850 гПа и рассчитанные с помощью модели WRF [5] по данным реанализа NCEP [6] карты адвекции температуры в области материнского циклона.

На картах относительной топографии и AT850 в большинстве случаев — даже при отсутствии замкнутых изобар в очаге формирования ПМЦ — фиксировалась стандартная ситуация, характерная для циклогенеза от начальной до максимальной стадии развития: гребень тепла над приземным центром (начальная стадия) или в передней части образования (максимальное развитие), ложбина холода в тыловой части.

В большинстве случаев по расчетным полям горизонтальной адвекции температуры удалось диагностировать наличие циклонического образования в поле материнского циклона. Центр ПМЦ наблюдался в основном на стыке зон положительной и отрицательной адвекции.

Например, 1 сентября 2008 г. ПМЦ был зарегистрирован со спутника в 14 ч по гринвичскому времени (Greenwich Mean Time, GMT). Его центр располагался в высокоградиентном поле глубокого циклона, в его передней части, выходящей на акваторию Карского моря. Полярный мезовихрь не имел замкнутых изобар на приземной синоптической карте (рис. 2). Максимальные значения термической адвекции противоположных знаков в очаге формирования ПМЦ были зафиксированы в 12 ч, в дальнейшем они сохранялись в течение суток. Центр ПМЦ (по спутниковым данным) находился над Карским морем (над Обской губой). В передней части образования наблюдалась мощная адвекция тепла, в тыловой — адвекция холода.

В некоторых случаях в малоградиентных полях материнского циклона (или антициклона) по модельным расчетам удавалось получить замкнутые изобары в зоне формирования полярного мезоциклона, тогда как на фактической синоптической карте ПМЦ не наблюдался. Примером является модельная карта горизонтальной адвекции температуры воздуха и распределения давления на уровне моря за 3 сентября 2008 г., представленная на рис. 4. ПМЦ впервые был зафиксирован со спутника 1 сентября 2008 г. в 11 ч GMT; последний снимок был получен 4 сентября в 1 ч 35 мин GMT (рис. 3).

Его центр находился в малоградиентном поле обширного антициклона, расположенного над морями Тихоокеанского сектора Северного Ледовитого океана. На фактической карте погоды, представленной на рис. 4, в области обнаруженного

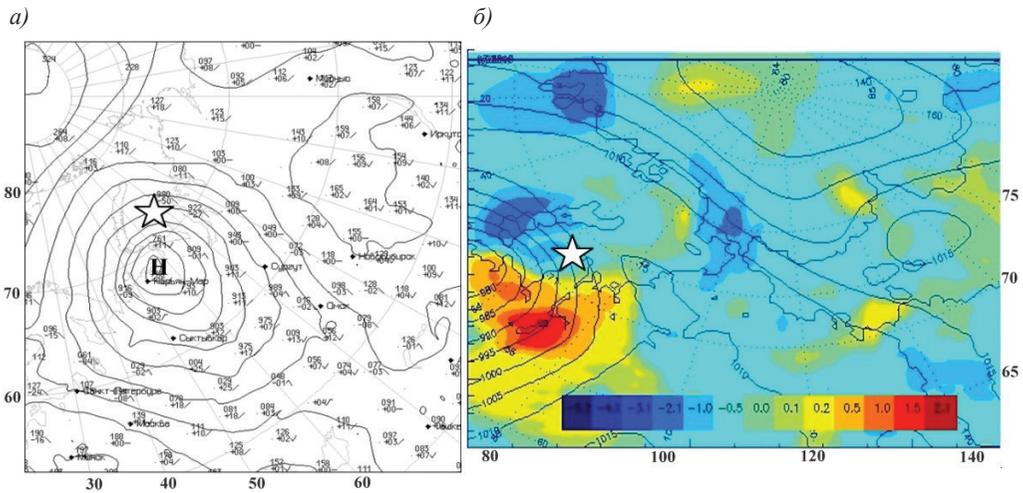


Рис. 2. Фактическая карта погоды (а) и модельная карта горизонтальной адвекции температуры воздуха (модель WRF) (б) за 1 сентября 2008 г.

а) 15 ч GMT, б) 12 ч GMT.

Звездочкой указано место зарождения полярного циклона.

Цветовая шкала — значения горизонтальной адвекции температуры (К/ч).

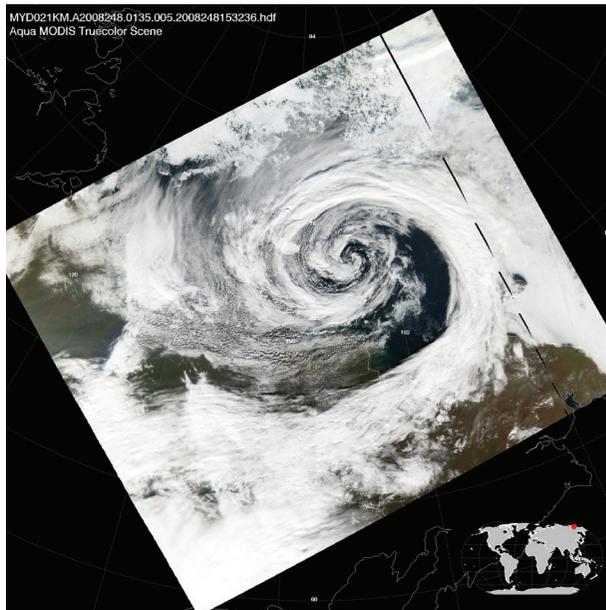


Рис. 3. Снимок ПМЦ у Новосибирских островов за 4 сентября 2008 г., 1 ч 35 мин GMT. Спутник Aqua, MODIS.

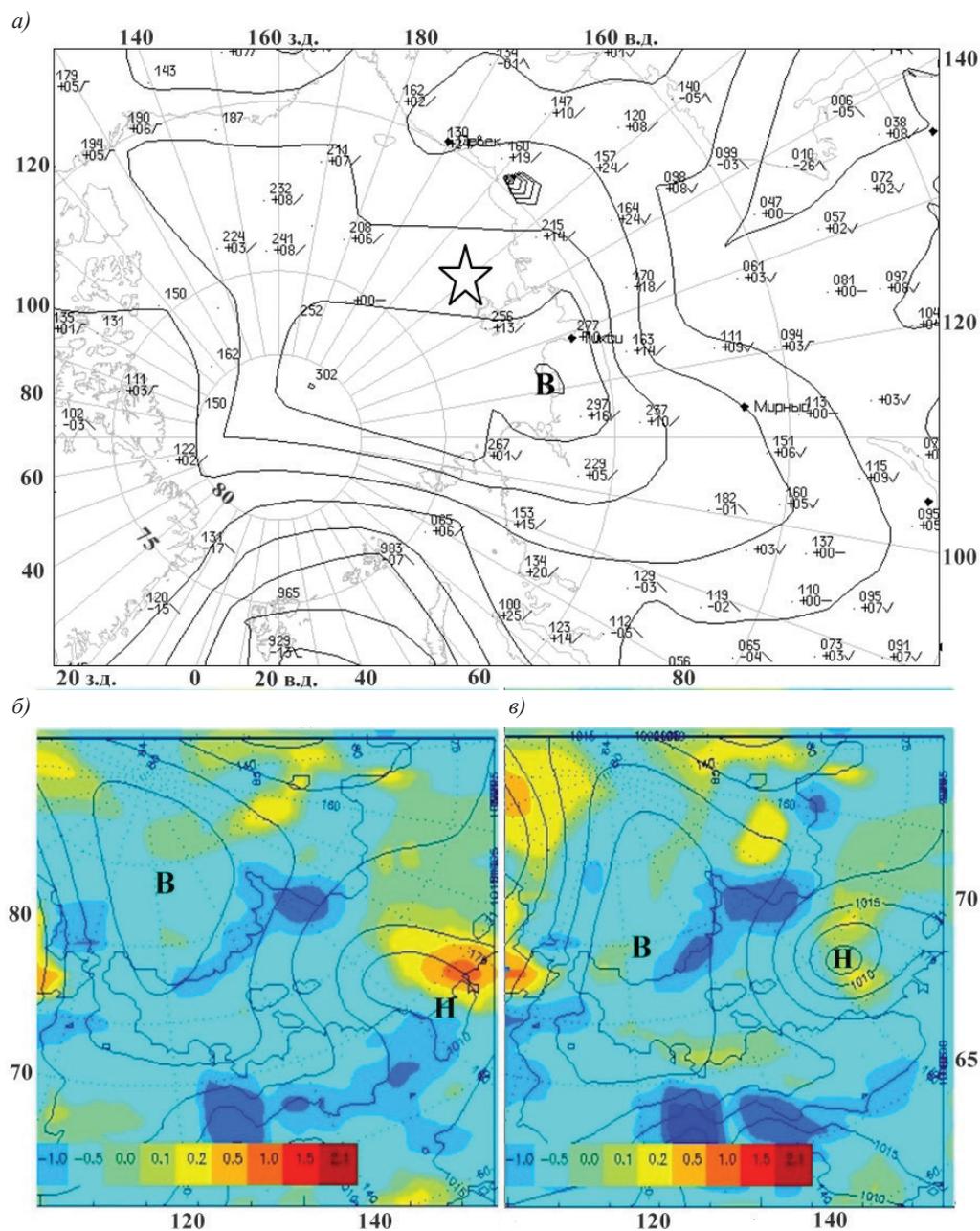


Рис. 4. Фактическая карта погоды (а) и модельные карты горизонтальной адвекции температуры воздуха (модель WRF) (б и в) за 3 сентября 2008 г.

а) 12 ч GMT, б) 0 ч GMT, в) 11 ч GMT.

Условные обозначения см. рис. 2.

со спутника мезовихря не наблюдается замкнутых изобар. В предыдущий срок (9 ч GMT) ситуация была аналогичной.

Согласно результатам расчетов по модели WRF в срок 0 ч GMT, за 11 часов до обнаружения полярного циклона со спутника, появляется замкнутая циркуляция с соответствующей термической адвекцией (центр образования находится на стыке очагов с положительным и отрицательным знаком). Наиболее вероятно, что к моменту обнаружения начинается окклюзирование ПМЦ, и основная часть мезовихря находится в области со слабоотрицательными и близкими к нулю значениями.

Вторым индикатором очага формирования полярного циклона является спиралевидность атмосферных движений. В областях циклогенеза спиралевидность имеет отрицательный знак. Наиболее часто в области материнского циклона со своими спиралевидными движениями формируется отдельное ядро, которое и указывает на зону возникновения ПМЦ. На рис. 5 представлено развитие мезовихря с 7 сентября (время обнаружения 7 ч GMT) до 8 сентября 2007 г. (время съемки 4 ч 15 мин GMT).

Центр ПМЦ находился на северо-западной периферии циклона, располагающегося над Ямалом и Западной Сибирью. В момент обнаружения в поле спиралевидных движений материнского циклона в его северо-западной части формируется ядро, которое прослеживается до 4 ч GMT 8 сентября.

Подобные ситуации наиболее часто фиксируются в высокоградиентных полях в районе Карского моря и моря Лаптевых. Для акватории Восточно-Сибирского моря анализ расчетных данных по спиралевидности не дал удовлетворительных результатов. Интересно, что в процессе анализа можно было обнаружить фоновые благоприятные условия, характерные для формирования полярных штормовых циклонов в различных районах Северного Ледовитого океана. Так, например, 7 октября 2007 г. в районе Карского моря наблюдалась ситуация (рис. 7), характерная для штормовых мезовихрей.

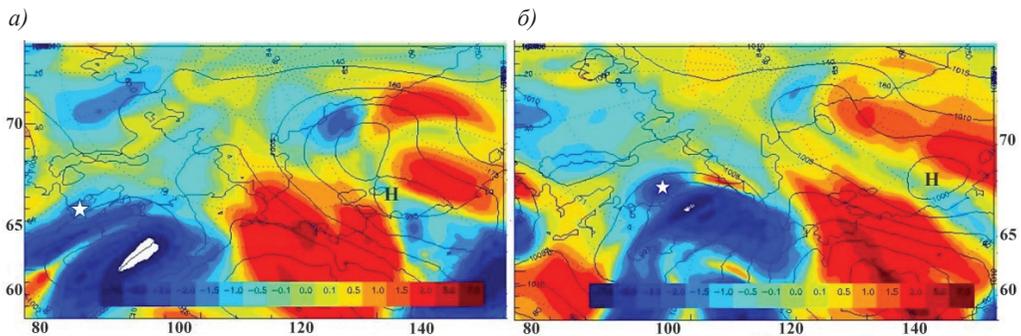


Рис. 5. Спиралевидность атмосферных движений в очаге формирования ПМЦ. Сентябрь 2007 г. Модель WRF.

а) 7 сентября, 7 ч GMT; б) 8 сентября, 4 ч GMT.

Звездочкой указано место зарождения полярного циклона.

Цветовая шкала — значения спиралевидности атмосферных движений ($\text{swirl} \cdot 100 \text{ м/с}^2$).

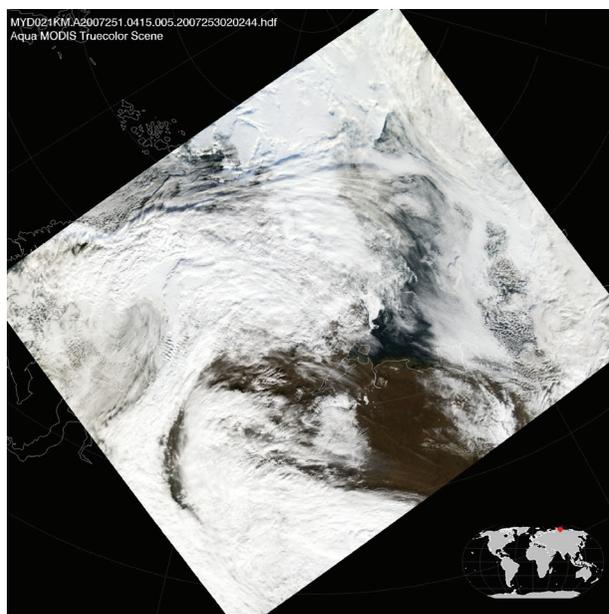


Рис. 6. Снимок ПМЦ у Обской губы за 8 сентября 2007 г., 4 ч 15 мин GMT. Спутник Aqua, MODIS [4].

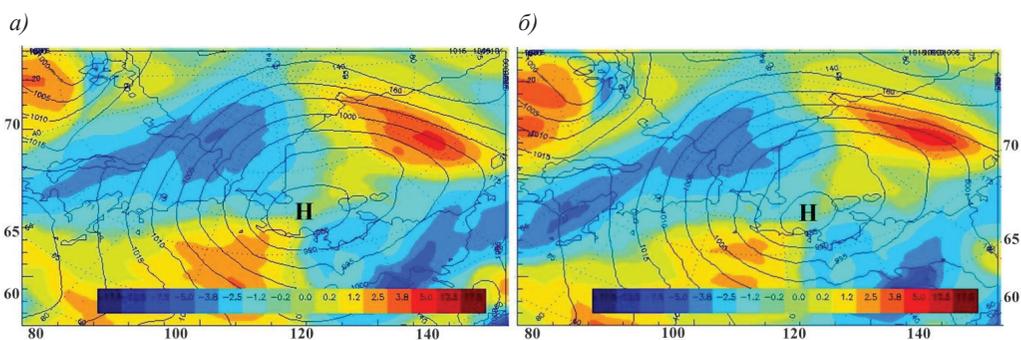


Рис. 7. Спиралевидность атмосферных движений. 7 октября 2007 г. Модель WRF.
а) 11 ч GMT, б) 14 ч GMT.

В районе Карского моря в течение нескольких часов на акватории в районе Байдарацкой губы сформировалось отдельное ядро с отрицательными значениями спиралевидности, что является благоприятным фоном для зарождения в этой области полярного циклона.

Следующим параметром, способным влиять на циклогенез, является динамическая неустойчивость атмосферных движений.

Как индикатор возникновения малых атмосферных возмущений динамическая неустойчивость также показала наиболее удовлетворительные результаты для сектора Карского моря. Обычно в зоне возникновения ПМЦ наблюдается положительная динамическая неустойчивость и отмечается контраст со значениями отрицательной бароклинной неустойчивости.

В ходе анализа модельных карт динамической бароклинной неустойчивости и кинетической энергии был сделан вывод об их взаимодополняющих свойствах. При увеличении динамической неустойчивости в зоне малых атмосферных возмущений фиксируется увеличение значений кинетической энергии (рис. 8).

Полярный мезоциклон впервые был зафиксирован со спутника в 18 ч GMT к северо-западу от островов Анжу (Новосибирские острова), а его последний снимок был получен 5 октября в 3 ч 35 мин GMT (рис. 9). В очаге формирования ПМЦ наблюдаются отдельные ориентированные меридионально области динамической неустойчивости, которые дублируются зонами с повышенным фоном кинетической энергии (рис. 8).

В районе Карского моря в высокоградиентных полях материнских циклонов отмечается рост динамической неустойчивости, что может объясняться фронтальной природой циклогенеза. Для зон атмосферных фронтов характерна значительная бароклинность атмосферы. Пример подобного циклогенеза представлен на рис. 10.

Анализ модельных карт вихревой составляющей скорости ветра и дивергенции потоков дает видимые результаты в случае интенсивных мезовихрей с наличием замкнутых изобар по модельным расчетам приземного давления на уровне моря. Они противоположны по знаку, наблюдаются в центральных частях барических образований. На рис. 11 представлен пример результатов модельных расчетов ротора ветра и дивергенции потоков для 3 сентября 2008 г.

В данном случае циклон не наблюдался на приземной синоптической карте в виде замкнутых изобар. По модельным расчетам удалось получить замкнутую

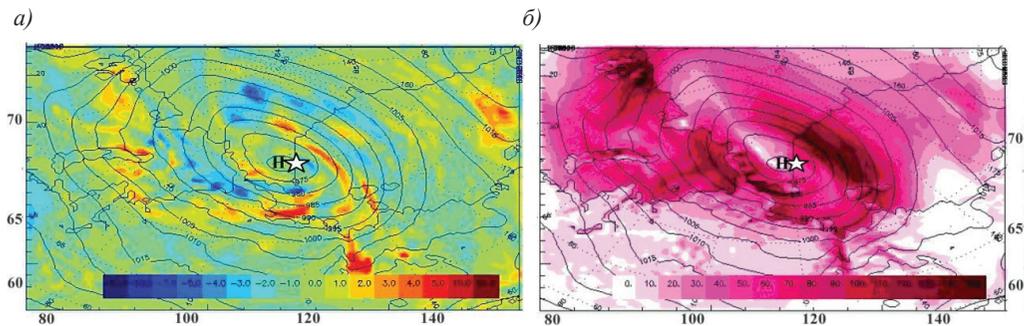


Рис. 8. Динамическая неустойчивость (а) и кинетическая энергия (б), ПМЦ в районе Новосибирских островов, 4 октября 2007 г. Модель WRF.

Звездочкой указано место зарождения полярного циклона.
Цветовая шкала — значения динамической неустойчивости ($\text{м}^2/\text{с}^2$).

циркуляцию в очаге формирования мезовихря. Координаты ПМЦ, полученного в результате моделирования, совпали с координатами мезовихря, обнаруженного со спутника. Максимальные по модулю значения вихревой составляющей скорости ветра и расходимости воздушных потоков (дивергенции) фиксируются в центральной части барического образования.

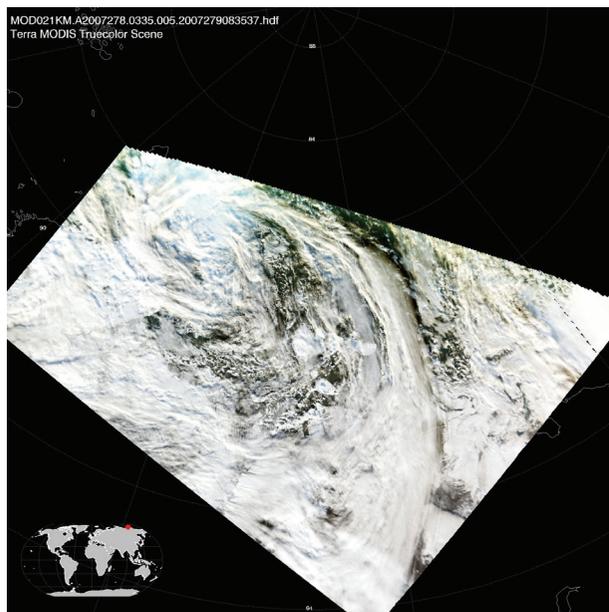


Рис. 9. Снимок ПЦ у островов Анжу за 5 октября 2007 г., 3 ч 35 мин GMT. Спутник Тетра, MODIS.

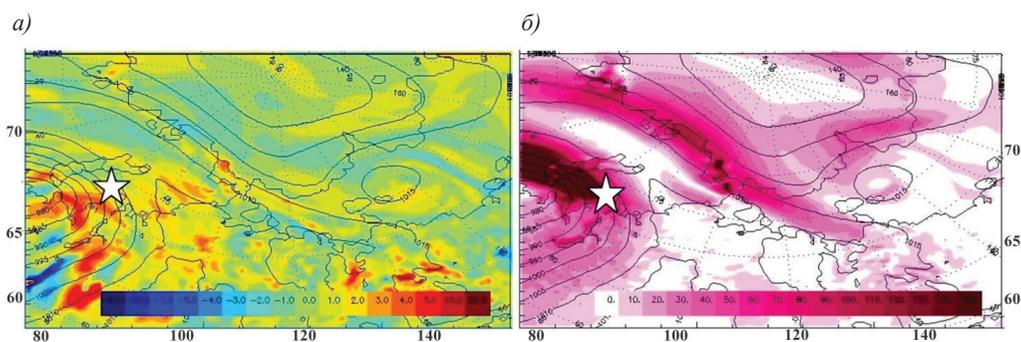


Рис. 10. Динамическая неустойчивость (а) и кинетическая энергия (б), ПМЦ в районе Карского моря над Обской губой, 1 сентября 2008 г. Модель WRF.

Условные обозначения см. рис. 8.

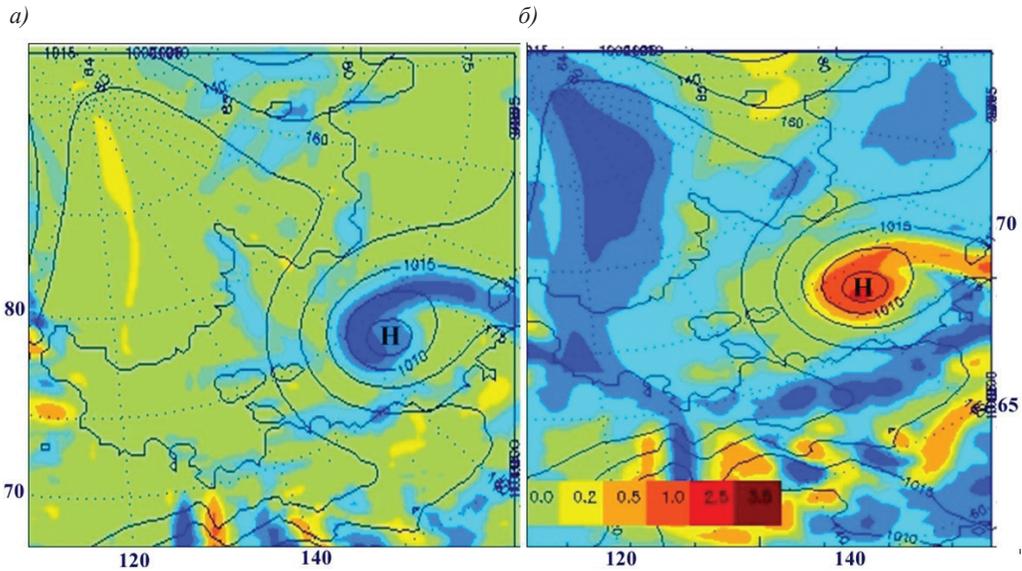


Рис. 11. Дивергенция потока ветра (а) и ротор ветра (б), ПМЦ в Восточно-Сибирском море, 3 сентября 2008 г. Модель WRF.

Заключение

В результате анализа таких составляющих «взрывного» полярного циклогенеза (ПМЦ), как термическая горизонтальная адвекция, спиралевидность атмосферных потоков, динамическая (бароклинная) неустойчивость и кинетическая энергия движений в средней тропосфере в районе циклогенеза, ротор ветра и дивергенция воздушных потоков, могут быть предложены подходы к методологии фонового прогноза очагов формирования малых атмосферных возмущений в российском секторе Северного-Ледовитого океана.

Для фонового прогноза необходимо использовать весь комплекс взаимодополняющих друг друга параметров: адвекцию температуры в тропосфере, спиралевидность воздушных потоков и динамическую неустойчивость. Для определения наиболее благоприятной для возникновения полярного циклона области необходимо сопоставлять расчетные карты динамической неустойчивости и кинетической энергии.

Для сектора моря Лаптевых и сектора Восточно-Сибирского моря наилучшие результаты дают расчеты термической адвекции и спиралевидности. Наиболее благоприятный фон в секторе Карского моря наблюдается в высокоградиентных полях глубоких циклонов, выходящих с континента на акваторию Карского моря в районе Чаунской губы в северо-восточном направлении.

Можно предположить, что при наличии высоких значений вихревой составляющей скорости ветра и расходимости воздушных потоков (дивергенции) полярный шторм будет особенно интенсивным и может считаться особо опасным явлением.

Список литературы

1. *Смирнова Ю.Е., Заболотских Е.В., Бобылев Л.П., Шапрон Б.* Статистические характеристики полярных циклонов в морях Северо-Европейского бассейна по данным спутниковых микроволновых радиометров // Исследование Земли из космоса. 2016. № 3. С. 27—36, doi:10.7868/S0205961415040119.
2. *Заболотских Е.В., Бобылев Л.П., Дикинис А.В., Неелова Л.О., Смирнова Ю.Е.* Особенности формирования и классификация штормовых мезомасштабных вихрей // Ученые записки РГГМУ. 2010. № 16. С. 59—77
3. Polar Lows: Mesoscale Weather Systems in the Polar Regions / Eds.: E. Rasmussen, J. Turner. Cambridge: Cambridge University Press. 2003. 612 p.
4. *Holz, R.E., S.A. Ackerman, F.W. Nagle, R. Frey, S. Dutcher, R.E. Kuehn, M.A. Vaughan, and B Baum.* Global Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) cloud detection and height evaluation using CALIOP // J. Geophys. Res. 2008. V. 113, D00A19, doi:10.1029/2008JD009837.
5. *Michalakes J., Dudhia J., Gill D., Henderson T., Klemp J., Skamarock W., Wang W.* The Weather Research and Forecast Model: Software Architecture and Performance / Proc. 11th ECMWF Workshop on the Use of High Performance Computing In Meteorology, 25—29 October 2004, Reading, U.K.
6. National Centers for Environmental Prediction / National Weather Service / NOAA / U.S. Department of Commerce, 2000: NCEP FNL Operational Model Global Tropospheric Analyses, continuing from July 1999. Research Data Archive at the National Center for Atmospheric Research, Computational and Information Systems Laboratory, Boulder, CO. [Available online at <http://dx.doi.org/10.5065/D6M043C6>.] Accessed 10 07 2015- 11-14.