

Сравнительная оценка существующих и перспективных методов исследования в области мониторинга и прогнозирования мезомасштабных циклонических вихрей, включая полярные циклоны

Е.В. Заболотских¹, Л.М. Митник², Л.П. Бобылев¹

¹ Научный фонд "Международный Центр по Окружающей Среде и Дистанционному Зондированию имени Нансена" (фонд "Нансен-Центр"),
199034 Санкт-Петербург, 14-ая линия ВО 7, оф. 49

E-mails: elizaveta.zabolotskikh@niersc.spb.ru;

² Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН,
690041 Владивосток, ул. Балтийская 43

E-mail: mitnik@poi.dvo.ru

Мезомасштабными циклоническими вихрями называют циклонические циркуляции в умеренных и высоких широтах с горизонтальными размерами 100-1000 км, которые зарождаются и продолжают существовать вне прямой связи с фронтальными системами синоптического масштаба. Полярные циклоны (ПЦ) представляют собой подгруппу наиболее интенсивных мезо-вихрей, представляющих собой кратковременные интенсивные погодные явления, наблюдаемые над холодными водами океана к полюсу от основной бароклинной зоны, и сопровождаемые скоростями ветра, превышающими штормовой порог. Время жизни таких циклонов от 3-х до 36 часов, что, совместно со сравнительно небольшими размерами, затрудняет их обнаружение и изучение. Своевременное обнаружение полярных циклонов, изучение их характеристик, отслеживание движения и предсказание представляют одну из важнейших задач современной науки.

В работе приведен сравнительный анализ работ, посвященных существующим и перспективным методам исследований в области мониторинга и прогнозирования мезомасштабных циклонических вихрей, включая полярные циклоны. Показано, что среди методов исследования мезомасштабных циклонических вихрей можно выделить: во-первых, теоретические исследования, связанные с изучением механизмов их зарождения, формирования, развития и диссипации. Отдельное место в исследованиях занимает моделирование мезомасштабных циклонических вихрей, хотя и сопровождающееся значительными трудностями, связанными с недостаточным пространственно-временным разрешением моделей и данных. И, наконец, это, исследование, в основе которых лежит анализ данных наблюдений.

Основным источником информации о мезомасштабных вихрях, включая полярные циклоны остаются спутниковые данные и поля геофизических параметров, построенные на основе этих данных. Наиболее перспективным при изучении ПЦ представляется совместное использование данных различных спутниковых приборов, позволяющее провести наиболее полный анализ погодной системы с привлечением всех возможных источников качественной и количественной информации, включая данные реанализа и данные метеонаблюдений.

Ключевые слова: мезомасштабные вихри, полярные циклоны, методы исследований, спутниковое дистанционное зондирование.

Введение

Интенсивные мезомасштабные циклоны (МЦ), или полярные циклоны (ПЦ) представляют собой короткоживущие, но обладающие большой энергией погодные системы, которые наблюдаются над холодными водами океана, имеют характерный масштаб до 1000 км и характеризуются скоростями ветра, превышающими 15 м/с, и осадками. Время жизни таких циклонов не превышает, как правило, 1-2 дней, что, в сочетании со сравнительно небольшими размерами, затрудняет их обнаружение и изучение [1].

Именно полярные циклоны, как наиболее интенсивные из мезовихрей, впервые были обнаружены на спутниковых изображениях в 60-х годах прошлого столетия, когда большое количество вихрей было замечено в Арктике зимой над свободной ото льда морской поверхностью. Антарктические мезомасштабные циклоны образуются реже и, чаще всего, не обладают такой энергией, как их северные аналоги, из-за существенно меньшей

разницы температур на границе вода-воздух. Тем не менее, мощные полярные циклоны возникают и в Южном океане, хоть и не столь часто, как над арктическими морями.

Основные районы распространения полярных циклонов в Северном полушарии – это моря Бофорта, Норвежское, Баренцево, Гренландское, Лабрадор, пролив Д'Эвиса, Датский пролив, Охотское и Берингово моря, залив Аляска. Полярные циклоны наблюдаются также и над Японским морем, расположенном значительно южнее основных районов формирования мезоциклонов в Атлантическом и Тихом океанах. Наиболее распространены полярные циклоны размером 100-500 км, жизненный цикл которых составляет от 3 до 36 час. Они образуются в зимнее время года, когда холодная арктическая воздушная масса распространяется над открытой поверхностью воды и на границе вода-воздух возникает резкий градиент температуры. Развитие циклонов сопровождается быстрым падением давления. При выходе на сушу или на лед, они быстро заполняются.

Мезоциклоны формируются и развиваются очень быстро. Небольшие размеры, короткий жизненный цикл и крайне редкое покрытие морских акваторий 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. При быстром падении давления скорость ветра может значительно превышать 15 м/с. Штормовой ветер, обрушение волн и низкие температуры воздуха могут привести к быстрому обледенению судов. Штормовой ветер и осадки серьезно влияют на хозяйственную деятельность прибрежных районов, транспортные и рыбохозяйственные операции, нефтяные платформы и др. Поэтому своевременное обнаружение и оценка характеристик мезомасштабных циклонов являются крайне актуальной задачей для обеспечения безопасности мореплавания, рыбного и нефтяного промысла и все возрастающего прибрежного строительства в России. Интерес к изучению ПЦ связан также и с общностью полярных и тропических циклонов, проявляющейся, в частности, в структуре поля облачности, наличии глаза и теплого ядра [2].

Возникновение мезомасштабных циклонов может быть обусловлено различными факторами, многообразны и их проявления на космических изображениях. Поле облачности наиболее интенсивных полярных циклонов во многом идентично полю облачности тропических циклонов. На спутниковых изображениях хорошо различим безоблачный «глаз», окруженный мощной облачностью стены глаза, что и вызвало появление термина "арктический ураган" для описания наиболее интенсивных полярных циклонов.

Детальная внутренняя структура МЦ изучена слабо, поскольку они наблюдаются над океанами, где сеть метеорологических измерений редкая. В связи с этим следует подчеркнуть важность измерений, выполненных аппаратурой, установленной на самолетах [3, 4]. Косвенные выводы о внутренней динамике МЦ можно сделать на основании анализа спутниковых видимых и ИК-изображений 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 теп-

лой 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 же время ряд МЦ обладает существенной осевой симметрией, характерной, скорее, для тропических циклонов [5].

Необходимость исследований МЦ

Актуальность исследований МЦ связана с двумя факторами. Во-первых, с тем, что МЦ представляют собой экстремальное, опасное явление, и, во-вторых, с тем, что их очень трудно изучать и предсказывать. В описании мезоциклонов чаще всего используется информация о фактической погоде с прогнозом на период не более двух часов. Большинство численных моделей прогноза погоды не обладает разрешением, пригодным для изучения мезомасштабных вихрей. Из-за редкой сети береговых метеостанций и нерегулярных судовых метеорологических наблюдений в море, быстрого перемещения и короткого жизненного цикла мезоциклоны далеко не всегда выявляются в поле давления на картах приземного синоптического анализа.

В то же время, их разрушительная сила огромна. Сильный ветер угрожает безопасности судоходства. Особую опасность представляет обледенение, вероятность и интенсивность которого возрастают со скоростью и высотой волн. Несомненно, что своевременное обнаружение МЦ, изучение их характеристик, отслеживание перемещения и, по возможности, прогнозирование, представляют одну из важнейших, до сих пор нерешенных задач современной науки. Особую актуальность эти исследования приобретают для России вследствие резкого уменьшения в последние годы площади морского льда в Северном Ледовитом океане и в арктических морях. Причиной сокращения площади ледяного покрова является наблюдаемое значительное потепление климата, на которое наслаиваются погодные явления, способствующие таянию льда. В 2007 г. была зафиксирована минимальная площадь льда [6]. С высвобождением морской поверхности ото льда появляются новые области, над которыми могут зарождаться полярные циклоны. К ним относятся моря Восточно-Сибирское, Чукотское, Лаптевых, которые раньше были покрыты льдом круглый год, а в последние годы осенью они свободны ото льда и над ними вероятно возникновение мезоциклонов. Предварительные исследования подтверждают этот вывод. Так, на рис. 1 приведен пример полярного циклона в Восточно-Сибирском море, проявившийся в поле водяного пара, восстановленном по измерениям пассивного микроволнового радиометра AMSR-E со спутника Aqua. Данный циклон образовался 4 сентября 2007 г. и просуществовал чуть больше полутора суток. Мезомасштабные циклоны к северу и югу от Берингова пролива зарегистрированы 12 ноября 2007 г. радиолокационной станцией с синтезированной апертурой со спутника Envisat, радиометром AMSR-E и скаттерометром QuikSCAT [7].

Наземные измерения в районах основного распространения полярных циклонов – к северу от основной бароклинной зоны – могут быть получены лишь эпизодически во время проведения специализированных судовых или самолетных экспериментов, поэтому основным источником информации о ПЦ остаются спутниковые данные и поля геофизических параметров, построенные на основе этих данных.

Методы изучения мезоциклонов

Практически все работы по изучению полярных циклонов носят многоплановый характер. Если выделить основную направленность исследований, их можно условно классифицировать по следующим направлениям.

Значительное количество публикаций посвящено анализу данных наблюдений [8-11]. Исторически это самые первые работы, связанные с интерпретацией поля облачности на спутниковых снимках, полученных в видимом и ИК-диапазонах. Данные публикации можно сгруппировать по типу измерительного устройства (сенсора), на основании данных которого проводится анализ; по району наблюдений; по количеству исследуемых МЦ. Часто в таких работах рассмотрен один или несколько мезовихрей. Ранние работы большей частью носили узконаправленный диагностический и/или описательный характер, в то время как в современных исследованиях для анализа МЦ привлекаются контактные измерения, карты приземного анализа, и чаще всего, данные спутникового зондирования, полученные несколькими приборами, работающими в различных диапазонах электромагнитного спектра, что позволяет получить более полную информацию о вихре.

Подобные исследования, несмотря на ограниченный характер, представляются, пожалуй, самыми обоснованными, поскольку опираются на данные реальных спутниковых наблюдений. Привлечение же к анализу дополнительных данных значительно расширяет сферу возможного использования результатов этих исследований.

В настоящее время появляется все больше статей, базирующихся на синергетическом анализе данных различных приборов [11, 7]. Но продолжаются и исследования МЦ, использующие измерения только одного прибора. По типу спутникового сенсора можно выделить работы, основанные на данных радиолокатора с синтезированной апертурой (РСА), радиометра или спектрометрического радиометра видимого и инфракрасного диапазонов длин волн, скаттерометра и микроволнового радиометра.

Вторую группу статей объединяют теоретические исследования, направленные на разработку концепций, лежащих в основе механизмов, объясняющих зарождение, развитие и диссипацию мезовихрей [12, 13]. Среди этих работ можно условно выделить собственно теории, и теории, подкрепленные рассмотрением мезовихрей, для которых имеются экспериментальные данные.

Описание численных экспериментов, моделирующих реальные мезоциклоны, составляют существо третьего направления работ [14-16]. Моделирование сопровождается значительными трудностями, связанными с недостаточным пространственно-временным разрешением имеющихся данных. Однако в последние годы появились климатические модели, главным образом, региональные, обладающие повышенным разрешением, и адекватно воспроизводящие полярные циклоны в обоих полушариях.

Отдельно выделяются исследования, ориентированные на практическое использование данных наблюдений и результатов численных моделей в задачах предсказания возникновения и перемещения мезомасштабных циклонов [17].

Наконец, целый ряд публикаций связан с изучением связи полярных циклонов и климата [18-23]. Эти работы базируются преимущественно на анализе спутниковых изображений облачности и результатов реанализа, т.е. на данных, представляющих достаточно длинные временные ряды, что позволяет исследовать климатологию мезовихрей. Их основными целями является изучение пространственно-временной изменчивости появления МЦ, и поиск взаимосвязи с важнейшими климатологическими циклами.

Возможности использования современных спутниковых данных для изучения и прогнозирования штормовых мезоциклонов

Появление в последние годы спутников, оснащенных активными и пассивными сенсорами, работающими в микроволновом диапазоне длин волн и обладающими более высоким разрешением и широкой полосой обзора, значительно расширило возможности получения информации о полярных мезовихрях. Сочетание микроволновых измерений со спутниковыми видимыми и ИК-изображениями облачности, с показаниями береговых и островных гидрометеорологических станций и результатами моделирования дает возможность исследовать зарождение и эволюцию мезомасштабных вихрей со значительно более высоким временным разрешением, детальностью и точностью, чем это было возможно ранее [11].

Изображения радиолокационных станций с синтезированной апертурой (РСА), установленных на спутниках RADARSAT, Envisat и ALOS, являются одними из наиболее ценных источников информации о ПЦ, так как обладают высоким пространственным разрешением и предоставляют исследователям распределение приводного ветра в области циклона независимо от наличия облачности и времени суток. К сожалению, изображения РСА не могут быть получены регулярно и поэтому непригодны для оперативного использования, хотя анализ архивов изображений РСА позволяет диагностировать случаи ПЦ. Дополнительным источником информации о поле приводного ветра служат данные скаттерометров QuikSCAT (до ноября 2009 г.) и MetOP. Хотя пространственное разрешение полей ветра, восстановленных по данным скаттерометров, уступает данным РСА более, чем на порядок, регулярность их получения и широкая полоса обзора делает их важным источником количественной информации о положении и динамике МЦ.

Полярные циклоны отчетливо проявляются в поле облачности на изображениях, полученных спектрорадиометрами MODIS на спутниках Terra и Aqua и радиометрами AVHRR на нескольких спутниках серии NOAA в видимом и ИК-диапазонах. Эти изображения, несмотря на доступность и частоту их получения, отражают в большинстве случаев структуру только верхнего слоя облачности.

Уникальные возможности для изучения полярных циклонов предоставляют данные микроволновых многоканальных сканирующих радиометров, таких как Special Sensor Microwave/Imager (SSM/I) на борту спутников серии Defense Meteorological Satellite Programme (DMSP) и Advanced Microwave Scanning Radiometer Earth Observing System (AMSR-E) на борту спутника Aqua. Как и упомянутые выше скаттерометры и радиометры видимого и ИК-диапазонов, микроволновые радиометры регистрируют излучение в широкой (около 1400 км) полосе обзора. Радиометр AMSR-E обладает более высоким, по сравнению с радиометром SSM/I, разрешением. Регулярность (в полярных районах временное разрешение составляет несколько раз в сутки), независимость от времени суток и погодных условий делает их бесценным источником информации о ПЦ, а наличие развитых алгоритмов восстановления параметров атмосферы и океана из измерений яркостных температур, позволяет получать не только качественную картину зарождения и эволюции атмосферных вихрей, но и количественно оценивать их характеристики.

Наиболее перспективным при изучении полярных циклонов представляется совместное использование данных различных приборов, позволяющее провести всесторонний анализ погодной системы с привлечением всех возможных источников качественной и количественной информации.

Благодарности

Обзор исследований был проведен при поддержке ФЦП "Науч. и н.-пед. кадры иннов. России" на 2009 - 2013 гг., ГК № П1570.

Литература

1. *Rasmussen E., Turner J.* Polar Lows. Mesoscale Weather Systems in the Polar Regions / Cambridge University Press, 2003. 612 P.
2. *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.
3. *Shapiro M. A., Fedor L. S., Hampel T.* Researching aircraft measurements of a polar low over the Norwegian Sea // *Tellus*. 1987. Vol. 39A. P. 272–306.
4. *Douglas M. W., Shapiro M. A., Fedor L. S., Saukkonen L.* Research aircraft observations of a polar low at the east Greenland ice edge // *Monthly Weather Review*. 1995. Vol. 123. No. 1. P. 5–15.
5. *Степаненко В. М., Вельтищев Н. Ф.* Мезометеорологические процессы // Издательство «Географический факультет МГУ», 2007. 127 с.
6. *Comiso J. C., Parkinson C. L., Gersten R., Stock L.* Accelerated decline in the Arctic sea ice cover // *Geophys. Res. Lett.*, 2008, vol. 35, L01703, doi:10.1029/2007GL03197.
7. *Mitnik L.M.* Mesoscale atmospheric vortices in the Okhotsk and Bering Seas: Results of satellite multisensor study. In: *Influence of Climate Change on the Changing Arctic and Sub-Arctic Conditions (NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security)* by Jacques C.J. Nichoul and A.G. Kostianoy (Eds), Springer, 2009. P. 37-56.
8. *Aakjaer P. D.* Polar lows affecting Denmark // *Tellus*. 1992. Vol. 44a. P. 155-172.
9. *Chunchuzov I., Vachon P. W., Ramsay B.* Detection and characterization of polar mesoscale cyclones in RADARSAT Synthetic Aperture Radar images of the Labrador Sea // *Canadian J. Rem. Sens.* 2000. Vol. 26. P. 213–230.
10. *Emanuel K. A., Rotunno R.* Polar lows as arctic hurricanes // *Tellus*. 1989. Vol. 41A. P. 1-17.
11. *Гурвич И.А., Митник Л. М., Митник М. Л.* Мезомасштабный циклогенез над дальневосточными морями: исследование на основе микроволновых радиометрических и радиолокационных измерений // *Исследование Земли из космоса*. 2008. № 5. С. 58-73.
12. *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.
13. *Harrold T. W., Browning K. A.* The polar low as a baroclinic disturbance // *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* 1969. Vol. 95. P. 710–723.
14. *Duncan C. N.* A numerical investigation of polar lows // *Quart. J. R. Meteorol. Soc.* 1977. Vol. 103. P. 255–267.
15. *Claud C., Heinemann G., Raustein E., Mcmurdie L.* Polar low “Le Cygne”: Satellite observations and numerical simulations // *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.* 2004. Vol. 130. P. 1075-1102.
16. *Guo J., Fu G., Li Z., et al.* Analyses and numerical modeling of a polar low over the Japan Sea on 19 December 2003 // *Atmospheric Research*. 2007. Vol. 85. P. 395–412.
17. *Noer G. Ovhd 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*, P. 120-124.
18. *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.
19. *Carleton A. M., Carpenter D. A.* Satellite climatology of “polar lows” and broadscale climatic associations for the Southern Hemisphere // *Intern. Journal Climatology*, 1990. Vol. 10. P. 219–246.
20. *Kolstad E.W.* A new climatology of favorable conditions for reverse-shear polar lows // *Tellus*. 2006. Vol. 58A. No. 3. P. 344–354.
21. *Blechs Schmidt A.-M.* A 2-year climatology of polar low events over the Nordic Seas from satellite remote sensing // *Geophys. Res. Letters*. 2008. Vol. 35., L09815, doi:10.1029/2008GL033706.
22. *Bracegirdle T. J., Gray S. L.* An objective climatology of the dynamical forcing of polar lows in the Nordic seas // *Intern. Journal Climatology*. 2008. Vol. 28. P. 1903-1919.
23. *Zahn M., von Storch H.* A long-term climatology of North Atlantic polar lows // *Geophys. Res. Letters*. 2008. Vol. 35. L22702, doi:10.1029/2008GL035769.

Comparative review of existing and perspective methods of the investigation of mesoscale lows including polar lows

E.V. Zabolotskikh ¹, L.M. Mitnik ², L.P. Bobylev ¹

¹ *Scientific Foundation "Nansen International Environmental and Remote Sensing Centre"*
(Nansen Centre),

199034 St. Petersburg, 14 Line V.I. 7, 49

E-mails: elizaveta.zabolotskikh@niersc.spb.ru;

² V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences (POI FEB RAS),

690041 Vladivostok, Russia, Baltiyskaya 43

E-mail: mitnik@poi.dvo.ru

Polar lows are short-living intense mesoscale atmospheric low pressure weather systems, developing poleward of the main baroclinic zone and associated with high surface wind speeds. They can be observed in both hemispheres, but the Arctic polar lows are significantly more intensive than Antarctic ones.

There are several factors complicating strongly the task of the polar low study: small size and short lifetime of polar lows makes them quite difficult to detect; sparse synoptic observations cannot provide sufficient data for modeling and forecasting; resolution of existing numerical weather models is not sufficient; most of polar lows are not revealed at surface analysis maps.

The actuality of the polar low research is stipulated by a number of factors: polar lows are associated with heavy snowfalls and high surface wind speeds, so having high destructive power; they are the threat to such businesses as oil and gas exploration, fisheries and shipping; they could worsen because of global warming. Therefore, the study of polar lows, their timely detection, tracking and forecasting represent a challenge for today science.

In the review the approaches in polar low studies are discussed. Several approaches can be distinguished among the methods of the polar low study. The main of them include: deep insight into the mechanisms responsible for the polar low genesis and elaboration of the theory of polar low generation and evolution; polar low modeling, which encounters many difficulties due to the insufficient temporal and spatial resolution of the most of the modern models; and - the analysis of the satellite data. The most informative studies include the comprehensive joint analysis of satellite data from various instruments providing the most complete information about polar low development.

Keywords: mesoscale cyclones, polar lows, investigation approaches, satellite remote sensing.