

## Арктические мезоциклоны по спутниковым данным, данным реанализа и модельным расчетам

М.Г. Акперов<sup>1</sup>, И.И. Мохов<sup>1,2</sup>, М.А. Дембицкая<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, 119017, Россия  
E-mail: aseid@ifaran.ru*

<sup>2</sup>*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова  
Москва, 119991, Россия*

Оценена возможность выявления полярных мезоциклонов (ПМЦ) в атмосфере европейского сектора Арктики (ЕКА) по разным данным реанализа (NASA-MERRA, ERA-INTERIM, NCEP-CFSR, ASR) с различным пространственным разрешением и по расчетам с региональной климатической моделью высокого разрешения (РКМ HIRHAM5). Получено, что по данным реанализа можно отождествлять до 65% арктических мезоциклонов, выявленных по спутниковым данным для 2002–2008 гг. (проект STARS – Sea Surface Temperature and Altimeter Synergy for Improved Forecasting of Polar Lows). Отмечено, что по данным арктического реанализа ASR при высоком пространственном разрешении воспроизводится больше ПМЦ, чем по остальным данным реанализа с более грубым пространственным разрешением. Отмеченные различия в характеристиках арктических мезоциклонов связаны как с особенностями моделей, используемых в реанализах, так и с особенностями ассимиляции данных.

С использованием региональной климатической модели для арктических широт идентифицируется примерно столько же ПМЦ, как и по данным арктического реанализа ASR с высоким пространственным разрешением. Для воспроизведения мелких ПМЦ необходимы модели с более высоким пространственным разрешением и с адекватным описанием мезомасштабных процессов в Арктике.

**Ключевые слова:** Арктика, полярные мезоциклоны, реанализ, спутниковые данные, региональная климатическая модель

*Одобрена к печати: 14.03.2017  
DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-3-297-304*

### Введение

В атмосфере высоких широт особую роль играют полярные мезоциклоны (ПМЦ). Они характеризуются коротким временем жизни (менее суток) и сравнительно небольшими характерными размерами (с диаметром менее 1000 км). ПМЦ свойственны холодному периоду года, когда арктический (или антарктический) холодный воздух натекает на более теплую морскую поверхность (Rasmussen, Turner, 2003; Мохов и др., 2007). Поскольку характерные размеры и время жизни полярных мезоциклонов меньше, чем для атмосферных вихрей синоптического масштаба, они не всегда обнаруживаются по данным реанализа, в частности по данным с относительно низким пространственным разрешением. Следует также отметить, что метеорологическая наблюдательная сеть в высоких широтах Северного полушария достаточно разреженная. В связи с этим особое значение для анализа характеристик полярных мезоциклонов имеют спутниковые данные. Использование спутниковых измерений позволяет получить не только информацию о формировании и эволюции полярных мезоциклонов (в видимом и ИК-диапазоне), но и оценить их интенсивность, а также параметры атмосферы и океана (Гурвич и др., 2009; Гурвич, Пичугин, 2013). Для более полного и разностороннего анализа целесообразно использовать спутниковые данные в сочетании с данными реанализа и расчетами с региональными моделями для арктического региона.

Оценки на основе данных реанализа ERA40 и ERA-INTERIM свидетельствуют об ограниченности данных реанализа для воспроизведения всего спектра размеров ПМЦ (Condrón et al., 2006; Laffineur et al., 2014; Zappa et al., 2014). Согласно (Condrón et al., 2006) по данным реанализа ERA-40 с пространственным разрешением около 250 км повторяемость мезоциклонов в северной Атлантике существенно меньше, чем по спутниковым данным. По данным реанализа ERA-Interim с пространственным разрешением около 75 км повторяемость полярных мезоциклонов лучше согласуется с полученной по спутниковым данным (Noer et al., 2011). Около 70% полярных мезоциклонов выявляется на основе данных оперативных прогнозов (~50 км) Европейского центра среднесрочных прогнозов (ECMWF) (Laffineur et al., 2014; Zappa et al., 2014). В работах (Kolstad et al., 2016; Варенцов и др., 2016) отмечена существенная роль региональных климатических моделей со «спектральным притягиванием» при анализе режимов ПМЦ, способных достаточно хорошо воспроизводить характеристики мезоциклонической активности в арктическом регионе.

В данной работе оцениваются возможности выявления арктических мезоциклонов над европейским сектором Арктики на основе различных современных данных реанализа с разным пространственным разрешением, а также расчетов с арктической региональной климатической моделью.

### **Методы анализа и используемые данные**

Характеристики полярных циклонов (пространственное распределение, повторяемость, размеры) над европейским сектором Арктики (ЕСА) определялись с помощью метода идентификации циклонов, описанного в (Акперов и др., 2007; Акперов, Мохов, 2010, 2013; Акперов et al., 2015). Циклоны определяются как области пониженного давления, ограниченные замкнутыми изобарами, с учетом особых условий для арктического региона (Акперов et al., 2015). В качестве исходных данных использовались поля атмосферного давления на уровне моря по данным реанализа с 6-часовым разрешением и по расчетам с региональной моделью. Данный алгоритм применялся в рамках международного проекта IMILAST, целью которого является сравнение и диагностика характеристик среднеширотных циклонов (Акперов, Мохов, 2010; Neu et al., 2013; Ulbrich et al., 2013). Сравнение с имеющимися данными наблюдений и результатами расчетов с аналогичными алгоритмами свидетельствует о надежности используемого метода для анализа циклонической активности в арктическом регионе (Акперов et al., 2015).

Использовались данные глобальных атмосферных реанализов NASA-MERRA (Rienecker et al., 2011) (далее MERRA), ERA-Interim (Dee et al., 2011) (далее ERA), арктического реанализа ASR (Bromwich et al., 2009) и совместного («океан–лед–атмосфера») реанализа NCEP-CFSR (Saha et al., 2010) (далее CFSR). Анализировались также циклоны по расчетам с региональной климатической моделью HIRHAM5 (далее РКМ HIRHAM) для арктического региона (Dethloff et al., 1996) со «спектральным притягиванием» (spectral

nudging) (von Storch et al., 2000). В качестве граничных условий для РКМ HIRHAM использовались данные реанализа ERA-Interim. Описание используемых данных приведено в табл. 1.

Таблица 1. Используемые данные для анализа арктических мезоциклонов в ЕСА для периода 2002–2008 гг.

<i>Данные</i>		<i>Пространственное разрешение, км</i>	<i>Схема усвоения данных</i>	<i>Общее число арктических мезоциклонов</i>
<b>Спутниковые данные</b>	STARS	1		170
	ASR	30	WRFDA-3DVAR	110
<b>Реанализ</b>	NASA-MERRA	~50	GMAO GEOS-5	103
	NCEP-CFSR	~50	3D-VAR	107
	ERA-INTERIM	~75	4D VAR	104
<b>Модель</b>	РКМ HIRHAM	25		111

Для сравнения использовались спутниковые данные проекта STARS (Sea Surface Temperature and Altimeter Synergy for Improved Forecasting of Polar Lows) для полярных мезоциклонов (Noer et al., 2011). Данные STARS (версия 3) характеризуют параметры мезоциклонов над акваторией Норвежского и Баренцева морей с часовым разрешением для периода 2002–2011 гг. При формировании этого архива данных наряду со спутниковыми данными использовались результаты модельных расчетов и результаты экспертного анализа синоптических карт. При этом основным источником данных для ПМЦ были ИК-изображения со спутника NOAA (AVHRR).

Арктические мезоциклоны, полученные по данным реанализа и по расчетам с РКМ HIRHAM, сопоставлялись с конкретными мезоциклонами, выявленными по спутниковым данным. Анализировались данные для холодных периодов года (октябрь–апрель) в 2002–2008 гг.

## Результаты

На рис. 1 дано пространственное распределение повторяемости полярных мезоциклонов на основе спутниковых данных (Noer et al., 2011), а также по данным реанализа и по расчетам с региональной климатической моделью над европейским сектором арктического бассейна в 2002–2008 гг. для холодного периода года (октябрь–апрель). Наибольшая

повторяемость полярных мезоциклонов отмечается над акваторией вдоль Скандинавского полуострова от Норвежского моря до Баренцева. При этом по разным данным реанализа подтверждается от 60% (NASA-MERRA) до 65% (ASR) конкретных ПМЦ, выявленных по спутниковым данным STARS (табл. 1). Наиболее сильные различия повторяемости ПМЦ по спутниковым данным и по данным реанализа отмечаются для января, а наилучшее соответствие – для октября (рис. 2).

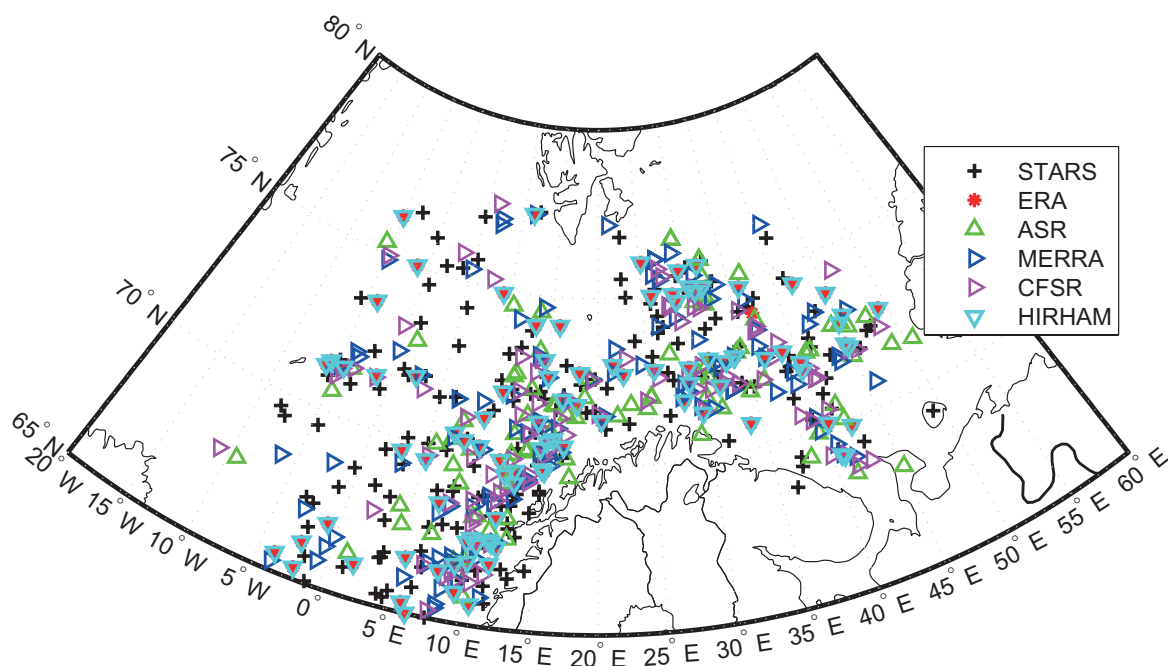


Рис. 1. Пространственное распределение ПМЦ над европейским сектором Арктики по разным данным для 2002–2008 гг.

По разным данным реанализа различия в повторяемости арктических мезоциклонов отмечаются для всего диапазона размеров в сравнении со спутниковыми данными STARS (рис. 3). При этом различия в повторяемости ПМЦ в зависимости от размеров по разным данным реанализа варьируются в небольших пределах.

Проводился также анализ полярных циклонов, полученных по расчетам с РКМ HIRHAM со «спектральным притягиванием». При достаточно высоком разрешении РКМ HIRHAM (25 км) повторяемость модельных ПМЦ сопоставима с повторяемостью по данным арктического реанализа ASR с высоким пространственным разрешением (30 км). Следует отметить, что подобные результаты получены с использованием модели со «спектральным притягиванием» (улучшающей воспроизведение атмосферной циркуляции внутри региона моделирования). По расчетам с РКМ HIRHAM диагностируется примерно 65% из числа ПМЦ, выявленных по спутниковым данным (табл. 1).

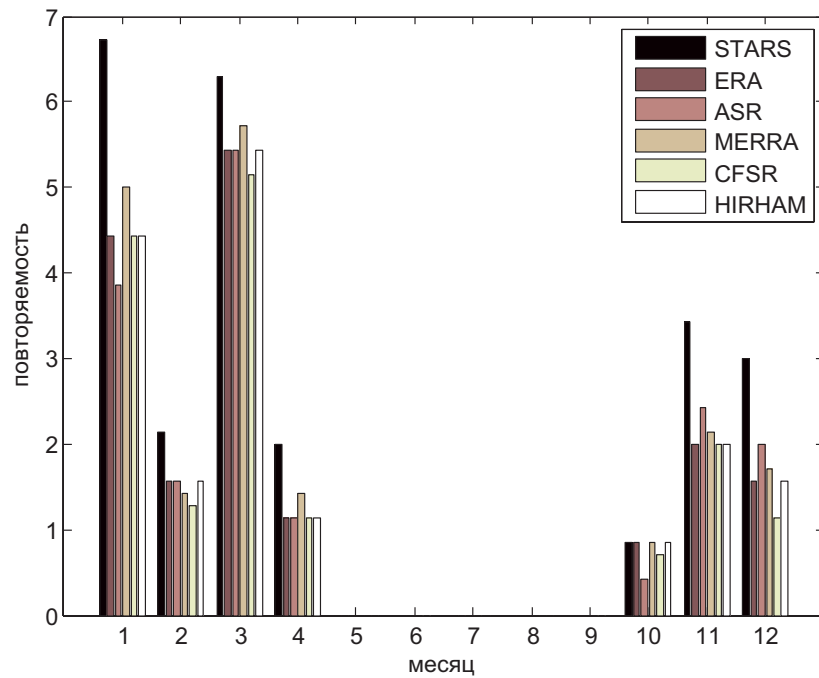


Рис. 2. Повторяемость полярных мезоциклонов в годовом ходе по спутниковым данным (STARS) и по разным данным реанализа для 2002–2008 гг.

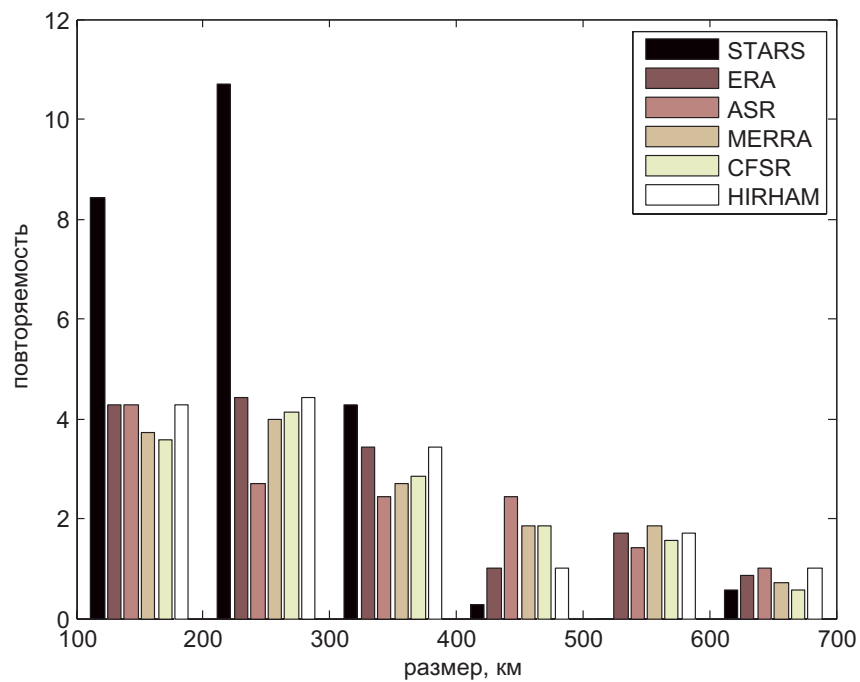


Рис. 3. Повторяемость (в год) полярных мезоциклонов в зависимости от их размеров по спутниковым данным (STARS) и по данным реанализа для 2002–2008 гг.

## Выводы

По современным данным реанализа и расчетам с региональной климатической моделью воспроизводятся не все полярные мезоциклоны, выявленные по спутниковым данным STARS для европейского сектора Арктики. Наиболее близкое соответствие со спутниковыми данными отмечено по данным арктического реанализа ASR с высоким пространственным

разрешением. Следует отметить, что различия в повторяемости ПМЦ между разными данными реанализа при выявлении ПМЦ являются незначительными. Различия в характеристиках полярных мезоциклонов, идентифицированных по разным данным реанализа, можно связать как с особенностями моделей, используемых для получения данных реанализа, так и с особенностями ассимиляции данных.

Повторяемость ПМЦ по расчетам с РКМ NIRNAM с разрешением 25 км сопоставима с полученной по данным арктического реанализа ASR с разрешением 30 км. Меньшее число ПМЦ в модели можно связать с описанием в модели мезомасштабных арктических процессов (их параметризацией).

Работа выполнялась в рамках проектов РФФИ и программ РАН. Анализ данных для Арктики проводился в рамках проекта РФФ №14-17-00647. Анализ функций распределения мезоциклонов – в рамках проекта РФФ №14-17-00806.

## Литература

1. Акперов М.Г., Бардин М.Ю., Володин Е.М., Голицын Г.С., Мохов И.И. Функции распределения вероятностей циклонов и антициклонов по данным реанализа и модели климата ИВМ РАН // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2007. Т. 43. № 6. С. 764–772.
2. Акперов М.Г., Мохов И.И. Сравнительный анализ методов идентификации внетропических циклонов // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2010. Т. 46. № 5. С. 620–637.
3. Акперов М.Г., Мохов И.И. Оценки чувствительности циклонической активности в тропосфере внетропических широт к изменению температурного режима // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2013. Т. 49. № 2. С. 129–136.
4. Варенцов М.И., Веземская П.С., Заболотских Е.В., Репина И.А. Оценка качества воспроизведения полярных мезоциклонов по данным реанализов и результатам регионального климатического моделирования // Исследование Земли из космоса. 2016. № 4. С. 168–191.
5. Гурвич И.А., Митник М.Л., Митник Л.М. Статистические характеристики, структура и параметры мезомасштабных циклонов над охотским морем по данным спутникового микроволнового и оптического зондирования // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2009. Т. 6. № 2. С. 111–117.
6. Гурвич И.А., Пичугин М.К. Исследование характеристик интенсивных мезомасштабных циклонов над дальневосточными морями на основе спутникового мультисенсорного зондирования // Исследование Земли из космоса. 2013. Т. 10. № 1. С. 51–59.
7. Мохов И.И., Акперов М.Г., Лагун В.Е., Луценко Э.И. Интенсивные арктические мезоциклоны // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2007. Т. 43. № 3. С. 291–297.
8. Akperov M., Mokhov I.I., Rinke A., Dethloff K., Matthes H. Cyclones and their possible changes in the Arctic by the end of the twenty first century from regional climate model Simulations // Theoretical and Applied Climatology. 2015. Vol. 22. No. 1–2. P. 85–96.
9. Bromwich D.H., Hines K.M., Bai L.-S. Development and testing of Polar WRF: 2. Arctic Ocean // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. 2009. Vol. 114. P. D08122.
10. Condron A., Bigg G.R., Renfrew I.A. Polar mesoscale cyclones in the northeast Atlantic: Comparing climatologies from ERA-40 and satellite imagery // Mon. Wea. Rev. 2006. Vol. 134. No. 5. P. 1518–1533.
11. Dee D.P., Uppala S.M., Simmons A.J., Berrisford P., Poli P., Kobayashi S., Andrae U., Balmaseda M.A., Balsamo G., Bauer P., Bechtold P., Beljaars A.C.M., van de Berg L., Bidlot J.-R., Bormann N., Delsol C., Dragani R., Fuentes M., Geer A., Haimberger L., Healy S., Hersbach H., Hölm E.V., Isaksen I., Kållberg P.W., Köhler M., Matricardi M., McNally A., Monge-Sanz B.M., Morcrette J.-J., Peubey C., De Rosnay P., Tavolato C., Thepaut J.-J., Vitart F. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system // Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. 2011. Vol. 137. P. 553–597.
12. Dethloff K., Rinke A., Lehmann R., Christensen J.H., Botzet M., Machenhauer B. Regional climate model of the Arctic atmosphere // Journal of Geophysical Research. 1996. Vol. 101D. No. 18. P. 23401–23422.
13. Kolstad E.W., Bracegirdle T.J., Zahn M. Re-examining the roles of surface heat flux and latent heat release in a “hurricane-like” polar low over the Barents Sea // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. 2016. Vol. 121. No. 13. P. 7853–7867.
14. Laffineur T., Claud C., Chaboureaud J.-P., Noer G. Polar Lows over the Nordic Seas: Improved Representation in ERA-Interim Compared to ERA-40 and the Impact on Downscaled Simulations // Monthly Weather Review. 2014. Vol. 142. No. 6. P. 2271–2289.
15. Neu U., Akperov M.G., Bellenbaum N., Benestad R.S., Blender R., Caballero R., Coccozza A., Dacre H.F., Feng Y., Fraedrich K., Grieger J., Gulev S., Hanley J., Hewson T., Inatsu M., Keay K., Kew S.F., Kindem I., Leckebusch G.C., Liberato M.L.R., Lionello P., Mokhov I.I., Pinto J.G., Raible C.C., Reale M., Rudeva I.,

- Schuster M., Simmonds I., Sinclair M., Sprenger M., Tilinina N.D., Trigo I.F., Ulbrich S., Ulbrich U., Wang X.L., Wernli H. IMILAST – a community effort to intercompare extratropical cyclone detection and tracking algorithms // *Bulletin of the American Meteorological Society*. 2013. Vol. 94. No. 4. P. 529–547.
16. Noer G., Saetra Ø., Lien T., Gusdal Y. A climatological study of polar lows in the Nordic Seas // *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 2011. Vol. 137. No. 660. P. 1762–1772.
  17. Rasmussen E.A., Turner J. Polar lows. Cambridge: Cambridge University press, 2003. P. 602.
  18. Rienecker M.M., Suarez M.J., Gelaro R., Todling R., Bacmeister J., Liu E., Bosilovich M., Schubert S., Takacs L., Kim G.-K., Bloom S., Chen J., Collins D., Conaty A., da Silva A., Gu W., Joiner J., Koster R., Lucchesi R., Molod A., Owens T., Pawson S., Pegion P., Redder C., Reichle R., Robertson F., Ruddick A., Sienkiewicz M., Woollen J. MERRA: NASA's Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications // *Journal of Climate*. 2011. Vol. 24. P. 3624–3648.
  19. Saha S., Moorthi S., Pan H.-L., Wu X., Wang J., Nadiga S., Tripp P., Kistler R., Woollen J., Behringer D., Liu H., Stokes D., Grumbine R., Gayno G., Wang J., Hou Y.-T., Chuang H., Juang H.-M.H., Sela J., Iredell M., Treadon R., Kleist D., Van Delst P., Keyser D., Derber J., Ek M., Meng J., Wei H., Yang R., Lord S., van den Dool H., Kumar A., Wang W., Long C., Chelliah M., Xue Y., Huang B., Schemm J.-K., Ebisuzaki W., Lin R., Xie P., Chen M., Zhou S., Higgins W., Zou Ch.-Zh., Liu Q., Chen Y., Han Y., Cucurull L., Reynolds R.W., Rutledge G., Goldberg M. The NCEP Climate Forecast System Reanalysis // *Bulletin of American Meteorological Society*. 2010. Vol. 91. P. 1015–1057.
  20. von Storch H., Langenberg H., Feser F. A spectral nudging technique for dynamical downscaling purposes // *Monthly Weather Review*. 2000. Vol. 128. No. 10. P. 3664–3673.
  21. Ulbrich U., Leckebusch G.C., Grieger J., Schuster M., Akperov M., Bardin M.Yu., Feng Y., Gulev S., Inatsu M., Keay K., Kew S.F., Liberato M.L.R., Lionello P., Mokhov I.I., Neu U., Pinto J.G., Raible C.C., Reale M., Rudeva I., Simmonds I., Tilinina N.D., Trigo I.F., Ulbrich S., Wang X.L., Wernli H., and the IMILAST team. Are Greenhouse Gas signals of Northern Hemisphere winter extra-tropical cyclone activity dependent on the identification and tracking methodology? // *Meteorologische Zeitschrift*. 2013. Vol. 22. No. 1. P. 61–68.
  22. Zappa G., Shaffrey L., Hodges K. Can polar lows be objectively identified and tracked in the ECMWF operational analysis and the ERA-Interim reanalysis? // *Monthly Weather Review*. 2014. Vol. 142. No. 8. P. 2596–2608.

## Arctic mesocyclones from satellite data, reanalyses data and model simulations

M.G. Akperov<sup>1</sup>, I.I. Mokhov<sup>1,2</sup>, M.A. Dembickaya<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, Moscow 119017, Russia*  
E-mail: aseid@ifaran.ru

<sup>2</sup>*M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia*

The ability of the reanalyses data (NASA-MERRA, ERA-INTERIM, NCEP-CFSR, ASR) and regional climate model simulations (RCM HIRHAM5) to represent polar mesocyclones (PMCs) over European sector of the Arctic (ESA) in comparison with satellite data (STARS project – Sea Surface Temperature and Altimeter Synergy for Improved Forecasting of Polar Lows). Our results show that reanalyses can represent up to 65% of concrete observed polar mesocyclones from satellite data for 2002–2008. It is noted that Arctic reanalysis ASR with high spatial resolution reproduces more PMCs than from other reanalyses with a coarser resolution. Noted differences in the characteristics of Arctic mesocyclones from reanalyses data are related both with the model structure and data assimilation methods. RCM HIRHAM reproduces the same number of PMCs as Arctic reanalysis ASR with high spatial distribution. Models with a higher spatial resolution and with an adequate description of mesoscale processes in the Arctic are required to reproduce small-scale mesocyclones.

**Keywords:** Arctic, polar mesocyclones, reanalysis, satellite data, regional climate model

*Accepted: 14.03.2017*

*DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-3-297-304*

### References

1. Akperov M.G., Bardin M.Yu., Volodin E.M., Golitsyn G.S., Mokhov I.I., Probability distributions for cyclones and anticyclones from the NCEP/NCAR reanalysis data and the INM RAS climate model, *Izvestiya Atmos Ocean Phys*, 2007, Vol. 43, No. 6, pp. 705–712.

2. Akperov M.G., Mokhov I.I., A comparative analysis of the method of extratropical cyclone identification, *Izvestiya Atmos Oceanic Phys*, 2010, Vol. 46, No. 5, pp. 574–590.
3. Akperov M.G., Mokhov I.I., Estimates of the sensitivity of cyclonic activity in the troposphere of extratropical latitudes to changes in the temperature regime, *Izvestiya Atmos. Oceanic Phys.*, 2013, Vol. 49, No. 2, pp. 13–120.
4. Varentsov M.I., Verezemskaya P.S., Zabolotskikh E.V., Repina I.A., Otsenka kachestva vosproizvedeniya polyarnykh mezotsiklonov po dannym reanalizov i rezul'tatam regional'nogo klimaticheskogo modelirovaniya (Evaluation of the quality of polar low reconstruction using reanalysis and regional climate modelling), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2016, No. 4, pp. 168–191.
5. Gurvich I.A., Mitnik M.L., Mitnik L.M., Ctatisticheskie kharakteristiki, struktura i parametry mezomashtabnykh tsiklonov nad okhotskim morem po dannym sputnikovogo mikrovolnovogo i opticheskogo zondirovaniya (Statistical characteristics, structure and parameters of mesoscale cyclones over the Okhotsk Sea from satellite microwave and optical data), *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2009, Vol. 6, No. 2, pp. 111–117.
6. Gurvich I.A., Pichugin M.K., Issledovanie kharakteristik intensivnykh mezomashtabnykh tsiklonov nad dal'nevostochnymi moryami na osnove sputnikovogo mul'tisensornogo zondirovaniya (Research of characteristics of intensive mesoscale cyclones over the Far Eastern Seas on the basis of satellite multisensor sounding), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2013, Vol. 10, No. 1, pp. 51–59.
7. Mokhov I.I., Akperov M.G., Lagun V.E., Lutsenko E.I., Intense arctic mesocyclones, *Izvestiya Atmos Ocean Phys*, 2007, Vol. 43, No. 3, pp. 259–265.
8. Akperov M., Mokhov I.I., Rinke A., Dethloff K., Matthes H., Cyclones and their possible changes in the Arctic by the end of the twenty first century from regional climate model Simulations, *Theoretical and Applied Climatology*, 2015, Vol. 22, No. 1–2, pp. 85–96.
9. Bromwich D.H., Hines K.M., Bai L.-S., Development and testing of Polar WRF: 2. Arctic Ocean, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2009, Vol. 114, pp. D08122.
10. Condron A., Bigg G. R., Renfrew I.A., Polar mesoscale cyclones in the northeast Atlantic: Comparing climatologies from ERA-40 and satellite imagery, *Mon. Wea. Rev.*, 2006, Vol. 134, No. 5, pp. 1518–1533.
11. Dee D.P., Uppala S.M., Simmons A.J., Berrisford P., Poli P., Kobayashi S., Andrae U., Balmaseda M.A., Balsamo G., Bauer P., Bechtold P., Beljaars A.C.M., van de Berg L., Bidlot J.-R., Bormann N., Delsol C., Dragani R., Fuentes M., Geer A., Haimberger L., Healy S., Hersbach H., Hólm E.V., Isaksen L., Kållberg P.W., Köhler M., Matricardi M., McNally A., Monge-Sanz B.M., Morcrette J.-J., Peubey C., De Rosnay P., Tavolato C., Thepaut J.-J., Vitart F., The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2011, Vol. 137, pp. 553–597.
12. Dethloff K., Rinke A., Lehmann R., Christensen J.H., Botzet M., MACHENHAUER B., Regional climate model of the Arctic atmosphere, *Journal of Geophysical Research*, 1996, V. 101D, No. 18, pp. 23401–23422.
13. Kolstad E.W., Bracegirdle T.J., Zahn M., Re-examining the roles of surface heat flux and latent heat release in a “hurricane-like” polar low over the Barents Sea, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2016, Vol. 121, No. 13, pp. 7853–7867.
14. Laffineur T., Claud C., Chaboureaud J.-P., Noer G., Polar Lows over the Nordic Seas: Improved Representation in ERA-Interim Compared to ERA-40 and the Impact on Downscaled Simulations, *Monthly Weather Review*, 2014, Vol. 142, No. 6, pp. 2271–2289.
15. Neu U., Akperov M.G., Bellenbaum N., Benestad R.S., Blender R., Caballero R., Coccozza A., Dacre H.F., Feng Y., Fraedrich K., Grieger J., Gulev S., Hanley J., Hewson T., Inatsu M., Keay K., Kew S.F., Kindem I., Leckebusch G.C., Liberato M.L.R., Lionello P., Mokhov I.I., Pinto J.G., Raible C.C., Reale M., Rudeva I., Schuster M., Simmonds I., Sinclair M., Sprenger M., Tilinina N.D., Trigo I.F., Ulbrich S., Ulbrich U., Wang X.L., Wernli H., IMILAST – a community effort to intercompare extratropical cyclone detection and tracking algorithms, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2013, Vol. 94, No. 4, pp. 529–547.
16. Noer G., Saetra Ø., Lien T., Gusdal Y., A climatological study of polar lows in the Nordic Seas, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2011, Vol. 137, No. 660, pp. 1762–1772.
17. Rasmusson E.A., Turner J. Polar lows, *Cambridge: Cambridge University press*, 2003, 602 p.
18. Rienecker M.M., Suarez M.J., Gelaro R., Todling R., Bacmeister J., Liu E., Bosilovich M., Schubert S., Takacs L., Kim G.-K., Bloom S., Chen J., Collins D., Conaty A., da Silva A., Gu W., Joiner J., Koster R., Lucchesi R., Molod A., Owens T., Pawson S., Pegion P., Redder C., Reichle R., Robertson F., Ruddick A., Sienkiewicz M., Woollen J., MERRA: NASA's Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, *Journal of Climate*, 2011, Vol. 24, pp. 3624–3648.
19. Saha S., Moorthi S., Pan H.-L., Wu X., Wang J., Nadiga S., Tripp P., Kistler R., Woollen J., Behringer D., Liu H., Stokes D., Grumbine R., Gayno G., Wang J., Hou Y.-T., Chuang H., Juang H.-M.H., Sela J., Iredell M., Treadon R., Kleist D., Van Delst P., Keyser D., Derber J., Ek M., Meng J., Wei H., Yang R., Lord S., van den Dool H., Kumar A., Wang W., Long C., Chelliah M., Xue Y., Huang B., Schemm J.-K., Ebisuzaki W., Lin R., Xie P., Chen M., Zhou S., Higgins W., Zou Ch.-Zh., Liu Q., Chen Y., Han Y., Cucurull L., Reynolds R.W., Rutledge G., Goldberg M., The NCEP Climate Forecast System Reanalysis, *Bulletin of American Meteorological Society*, 2010, Vol. 91, pp. 1015–1057.
20. von Storch H., Langenberg H., Feser F., A spectral nudging technique for dynamical downscaling purposes, *Monthly Weather Review*, 2000, Vol. 128, No. 10, pp. 3664–3673.
21. Ulbrich U., Leckebusch G.C., Grieger J., Schuster M., Akperov M., Bardin M.Yu., Feng Y., Gulev S., Inatsu M., Keay K., Kew S.F., Liberato M.L.R., Lionello P., Mokhov I.I., Neu U., Pinto J.G., Raible C.C., Reale M., Rudeva I., Simmonds I., Tilinina N.D., Trigo I.F., Ulbrich S., Wang X.L., Wernli H., and the IMILAST team, Are Greenhouse Gas signals of Northern Hemisphere winter extra-tropical cyclone activity dependent on the identification and tracking methodology? *Meteorologische Zeitschrift*, 2013, Vol. 22, No. 1, pp. 61–68.
22. Zappa G., Shaffrey L., Hodges K., Can polar lows be objectively identified and tracked in the ECMWF operational analysis and the ERA-Interim reanalysis? *Monthly Weather Review*, 2014, Vol. 142, No. 8, pp. 2596–2608.