ИЗВЕСТИЯ РАН. СЕРИЯ ГЕОГРАФИЧЕСКАЯ, 2017, № 6, с. 39–46

ПРИРОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ И ДИНАМИКА ГЕОСИСТЕМ

УДК 551.515.1

ЦИКЛОНИЧЕСКАЯ АКТИВНОСТЬ В АРКТИЧЕСКОМ РЕГИОНЕ ПО МОДЕЛЬНЫМ РАСЧЕТАМ И ДАННЫМ РЕАНАЛИЗА

© 2017 г. Мирсеид Г. Акперов, Мария А. Дембицкая, Игорь И. Мохов

Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия
e-mail: aseid@ifaran.ru

Поступила в редакцию 04.06.2017 г.

Аннотация. Проведен анализ характеристик арктических циклонов и их внутри- и межгодовых вариаций, полученных по расчетам с региональной климатической моделью для Арктического региона (HIRHAM) со “спектральным притягиванием” (spectral nudging) в сопоставлении с данными реанализов с различным пространственным разрешением (ERA-Interim и ASR) для периода 2000–2009 гг. Отмечено, что характеристики арктических циклонов, особенности их пространственных распределений, годового хода и межгодовых вариаций по модельным расчетам в целом согласуются с данными реанализов, в том числе регионального арктического реанализа (ASR). Различия, отмеченные для повторяемости арктических циклонов, связаны, в частности, с разным пространственным разрешением данных и различиями в детектировании мелких циклонов, в том числе полярных мезоциклонов. Для воспроизведения мелких полярных мезоциклонов необходимы модели с более высоким пространственным разрешением и с адекватным описанием мезомасштабных процессов в Арктическом регионе.

Ключевые слова: Арктика, циклоны, климат, реанализ, региональная климатическая модель.

DOI: 10.7868/S0373244417060044

CYCLONE ACTIVITY IN THE ARCTIC FROM REANALYSES DATA AND REGIONAL CLIMATE MODEL SIMULATIONS

Mirseid G. Akperov, Mariya A. Dembitskaya, and Igor I. Mokhov

A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
e-mail: aseid@ifaran.ru

Received June 04, 2017

Abstract. The analysis of the cyclone characteristics and their intra- and interannual variations obtained from a regional climate model simulation for the Arctic (HIRHAM) with spectral nudging in comparison with reanalyses with different spatial resolution (ERA-Interim and ASR) for the period 2000–2009 was carried out. It is noted that the cyclones characteristics in the Arctic, especially their spatial distributions, annual and interannual variations from model simulations are generally consistent with those obtained from different reanalyses data, including the Arctic reanalysis (ASR). Differences are noted for the cyclone frequency, which might be related with different spatial resolution and with differences in detecting small cyclones, including polar mesocyclones. 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, cyclone, climate, reanalyses, region climate model.

Введение. Самые быстрые и сильные изменения климата отмечаются в Арктике [6, 11]. Приповерхностная температура в Арктике с конца XIX в. увеличивалась в среднем более чем вдвое быстрее, чем для Северного полушария в целом. При этом в течение последних трех десятилетий она росла со скоростью около 2 K за 30 лет, а для Северного полушария в целом – со скоростью около 0.8 K [7].

Так называемое арктическое усиление, характеризующее степень более резких изменений климата в высоких широтах по сравнению с более низкими, связано с влиянием ряда климатических обратных связей. На проявление арктического усиления влияют зависимость теплового излучения и альбедо системы от температуры, изменения вертикальной температурной стратификации

атмосферы, меридионального теплопереноса, содержания в атмосфере водяного пара (главного парникового газа в земной атмосфере) и облаков [4, 17]. Сокращение площади и толщины морских льдов в арктическом бассейне, приводит к увеличению потоков тепла из океана в атмосферу и ведет к изменению устойчивости атмосферы и циклонической активности в Арктическом регионе.

Уже при первых оценках чувствительности циклонической активности к изменениям климата были отмечены разные возможные тенденции в связи с изменениями бароклинной неустойчивости и статической устойчивости в атмосфере [9, 10] (см. также [2]). При этом следует учитывать особенности полярных широт с проявлением мощных полярных мезоциклонов, генерация которых связана с конвективными процессами в атмосфере [18].

Одна из ключевых проблем при анализе циклонической активности в полярных широтах связана с низкой плотностью сети метеорологических станций, от которой зависит качество анализируемых данных. Существенно улучшают возможности исследований спутниковые наблюдения, однако и с их использованием могут быть восстановлены не все необходимые данные для анализа характеристик циклонической активности и их изменчивости. Наиболее полный набор данных с достаточно хорошим пространственным и временным разрешением можно получать по расчетам с климатическими моделями, в частности, с использованием региональных моделей для Арктики. На основе современных моделей с ассимиляцией доступных данных наблюдений формируются данные реанализа. В настоящее время существуют данные разных реанализов глобального и регионального масштаба, которые используются для исследования циклонической активности в атмосфере, в том числе в полярных широтах.

В [12] было проведено сравнение характеристик циклонов, полученных по расчетам с региональной моделью HIRHAM для Арктики [14], в сопоставлении с полученными по данным реанализа ERA-40 [22] с относительно грубым пространственным разрешением. В данной работе в отличие от [12] для анализа циклонической активности используется новая версия региональной климатической модели HIRHAM со “спектральным притягиванием” (spectral nudging). В этой версии усвоение особенностей крупномасштабных составляющих атмосферной циркуляции осуществляется не только на боковых границах региональной модели, но и внутри области моделирования [23]. При этом характеристики циклонов, полученные по расчетам с новой версией региональной модели для Арктики, сопоставляются с полученными по данным разных реанализов, в том числе по данным регионального реанализа для арктических широт.

Используемые данные и методы анализа. В данной работе используются 6-часовые поля атмосферного давления на уровне моря с использованием расчетов с региональной климатической моделью (РКМ) HIRHAM для Арктики [14] в сопоставлении с данными реанализов – ERA-Interim [15] и ASR [13] для периода 2000–2009 гг. Горизонтальное разрешение данных составляет 0.75 градуса для реанализа ERA-Interim, 30 км ($\sim$0.30 градуса) для ASR и 25 км ($\sim$0.25 градуса) для РКМ HIRHAM. В качестве боковых условий для РКМ и регионального реанализа ASR (на основе мезомасштабной модели WRF-Polar) использовались данные реанализа ERA-Interim.

Для идентификации циклонов в Арктике использовался метод, описанный в [1, 3], с адаптацией для арктических широт [12]. Циклоны определялись как области пониженного давления, ограниченные замкнутыми изобарами. Интенсивность (глубина) циклона определялась разностью давлений в его центре и на последней замкнутой изобаре. Квадратом интенсивности (глубины) циклона характеризуется, как показано в [5], энергетика циклона (его кинетическая энергия). Характерный размер (радиус) циклона определялся расстоянием от геометрического центра циклона до последней замкнутой изобары. Следует отметить, что характеристики циклонов, полученных на основе данного метода, хорошо согласуются с характеристиками, полученными с использованием других методов идентификации циклонов [1, 16, 21], в частности, для полярных широт Северного полушария.

Проводился анализ характеристик циклонической активности в атмосфере арктических широт (выше 65° с.ш.), в том числе повторяемости, интенсивности и размеров зимних и летних арктических циклонов для первого десятилетия XX в. Статистическая значимость результатов (на уровне значимости $p < 0.1$) оценивалась с помощью t-критерия Стьюдента.

Результаты. При достаточно хорошей корреляции внутригодовых и межгодовых вариаций повторяемости арктических циклонов по модельным расчетам и по данным реанализа отмечены количественные различия среднего уровня повторяемости циклонов. В целом по расчетам с РКМ повторяемость циклонов выше, чем по данным реанализа. Средняя повторяемость циклонов (в сут) по модельным расчетам – 4.5($\pm$0.1) для зимы и 5.4($\pm$0.1) для лета, в скобках приведены оценки среднеквадратических отклонений. На основе

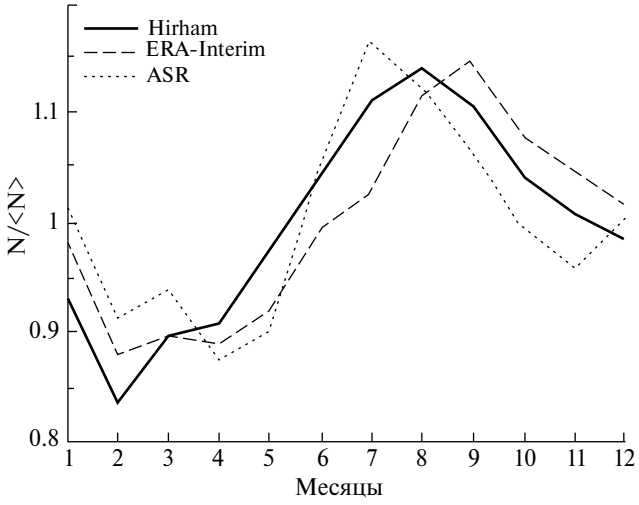

Рис. 1. Годовой ход нормированной повторяемости арктических циклонов по модельным расчетам (HIRHAM) и по данным реанализов (ERA-Interim и ASR).

данных реанализа ERA-Interim и ASR получено, соответственно, 3.8(±0.1) и 4.1(±0.1) для зимы, и 3.8(±0.1) и 4.4(±0.1) для лета.

На рис. 1 представлен средний годовой ход нормированной повторяемости арктических циклонов по модельным расчетам в сопоставлении с полученной по данным разных реанализов. Региональная модель достаточно хорошо воспроизводит годовой ход циклонической активности в Арктике.

На рис. 2 приведены межгодовые вариации нормированной повторяемости зимних (а) и летних (б) арктических циклонов по модельным расчетам и по данным реанализов. Особенности межгодовой изменчивости повторяемости арктических циклонов по расчетам с РКМ согласуются с полученными по данным реанализа. Корреляция межгодовых вариаций повторяемости циклонов по модельным расчетам и по данным реанализов статистически значима. Для реанализа ERA-Interim получены коэффициенты корреляции 0.92 для зимы и 0.97 для лета, а для реанализа ASR – соответственно 0.88 для зимы и 0.84 для лета.

На рис. 3 представлены распределения повторяемости арктических циклонов в зависимости от интенсивности (глубины) и размеров по расчетам с РКМ и по данным реанализа ERA-Interim и ASR для зимнего и летнего сезонов. Наибольшая повторяемость циклонов соответствует слабым циклонам (с глубиной менее 5 гПа) как для зимы, так и для лета (см. рис. 3а, б). При этом повторяемость слабых циклонов для РКМ несколько выше, чем по данным реанализа. Повторяемость циклонов с интенсивностью (глубиной) более 5 гПа по расчетам с помощью РКМ хорошо согласуется с их повторяемостью, полученной по данным реанализа ERA-Interim и ASR (различия в пределах нескольких процентов).

Повторяемость арктических циклонов по данным реанализа максимальна для циклонов с размерами

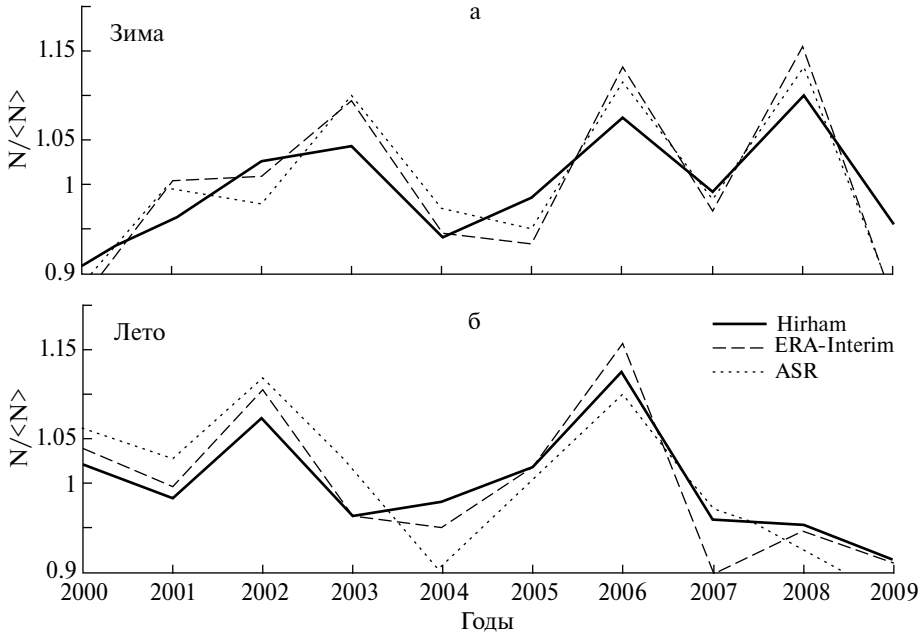

Рис. 2. Межгодовая изменчивость нормированной повторяемости арктических циклонов для зимы (а) и лета (б) по модельным расчетам (HIRHAM) и по данным реанализов (ERA-Interim и ASR).

в диапазоне 200–300 км и уменьшается, особенно летом, для более мелких вихрей. По модельным расчетам повторяемость в целом выше, чем по данным реанализа, особенно для более мелких циклонов – см. рис. 3в, г. Повторяемость мелких циклонов зимой (размер менее 200 км) также выше в РКМ (см. рис. 3в). При этом повторяемость летних арктических циклонов по модельным расчетам максимальна, как и по данным реанализа, для циклонов с размерами в диапазоне 200–300 км и уменьшается для более мелких вихрей. В то же время повторяемость зимних арктических циклонов по модельным расчетам максимальна для более мелких циклонов – в диапазоне размеров от 100 до 200 км.

Основные характеристики циклонической активности, в том числе пространственные распределения средней интенсивности (глубины) и размеров циклонов над Арктикой по расчетам с региональной климатической моделью достаточно хорошо согласуются с данными, полученными по данным реанализа для зимнего и летнего сезонов – рис. 4 и рис. 5. При этом они в целом согласуются и с результатами, полученными в [19, 20]. То, что повторяемость циклонов над основными областями циклонической активности по расчетам с региональной моделью выше, чем по данным реанализа, можно связать с полярными мезоциклонами, генерируемыми в модели.

Заключение. Проведен анализ характеристик арктических циклонов, в том числе их повторяемости, интенсивности и размеров, по расчетам с РКМ в сопоставлении с данными реанализа

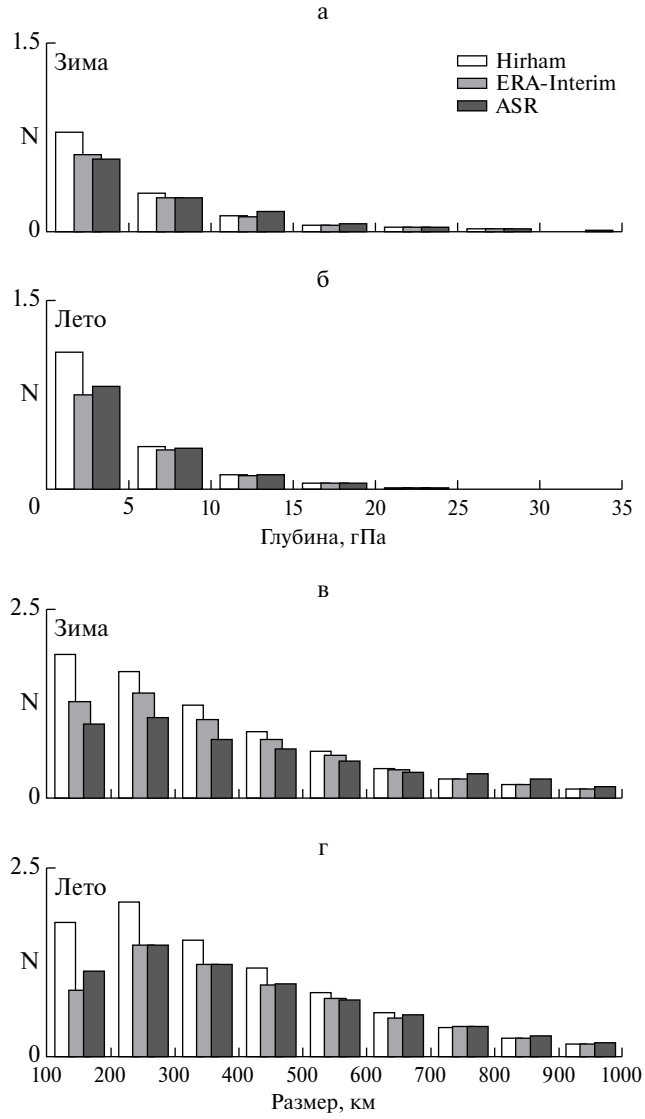

Рис. 3. Повторяемость арктических циклонов в зависимости от их глубины (а, б) и размера (в, г) для зимы (а, в) и лета (б, г) по модельным расчетам (HIRHAM) и по данным реанализов (ERA-Interim и ASR).

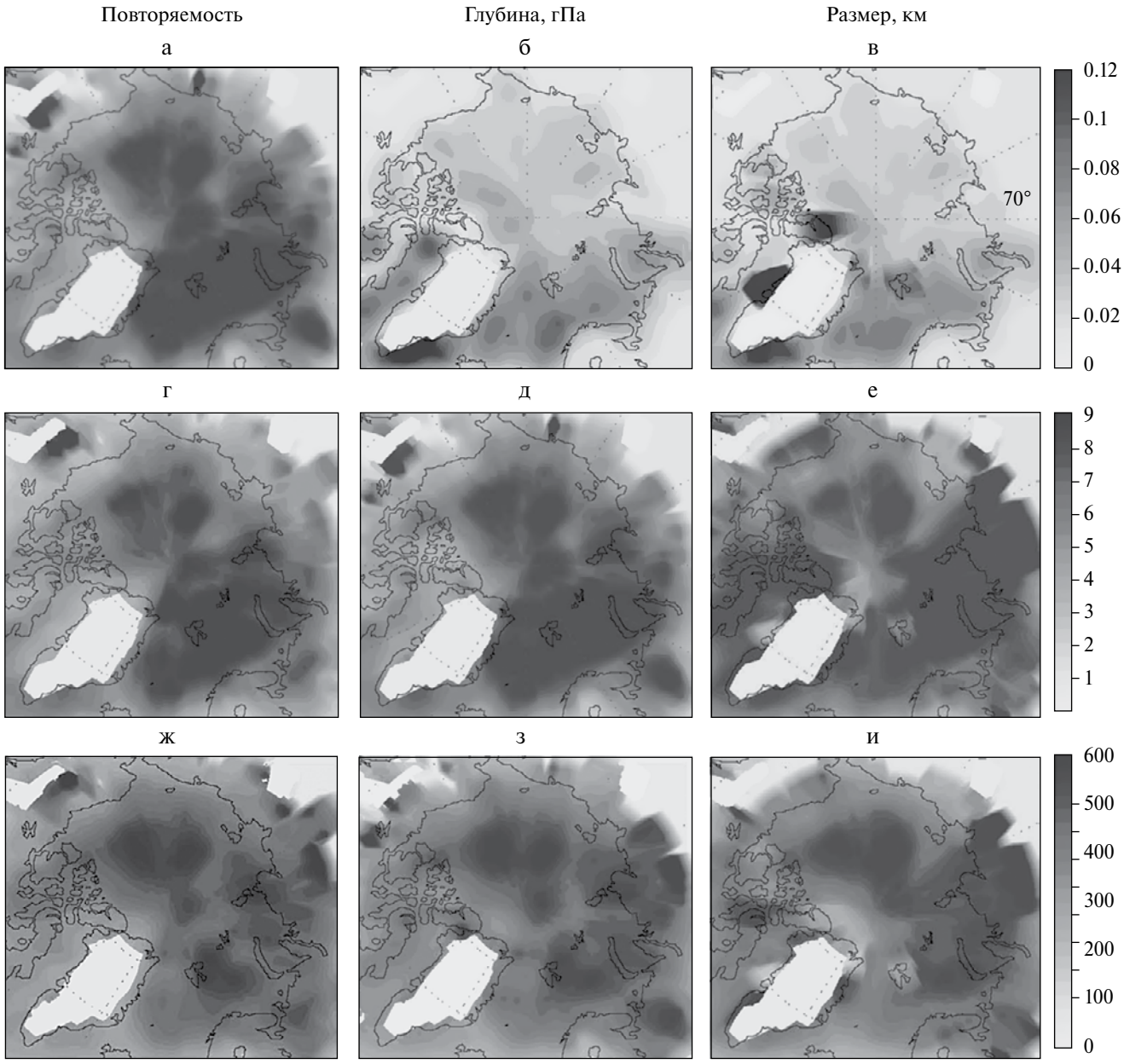

Рис. 4. Средние пространственные распределения разных характеристик зимних арктических циклонов для 2000–2009 гг.: повторяемости (а–в), глубины (г–е), размеров (ж–и); по расчетам с РКМ (а, г, ж), по данным ERA-Interim (б, д, з) и по данным ASR (в, е, и).

с различным пространственным разрешением. Отмечено, что характеристики арктических циклонов и региональные особенности по модельным расчетам в целом согласуются с полученными по данным реанализа в годовом ходе и межгодовой изменчивости. Наиболее сильные различия, отмеченные в повторяемости мелких арктических циклонов, могут быть связаны с тем, что в модели с достаточно высоким пространственным разрешением возможно детектирование полярных мезоциклонов с проявлением особенностей, зависящих от описания в модели ключевых региональных процессов, способствующих генерации. Для воспроизведения мелких полярных мезоциклонов необходимы модели с более высоким пространственным разрешением и с адекватным описанием мезомасштабных процессов в Арктике.

Благодарности. Работа была выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ, соглашение № 14.616.21.0082 (RFMEFI61617X0082).

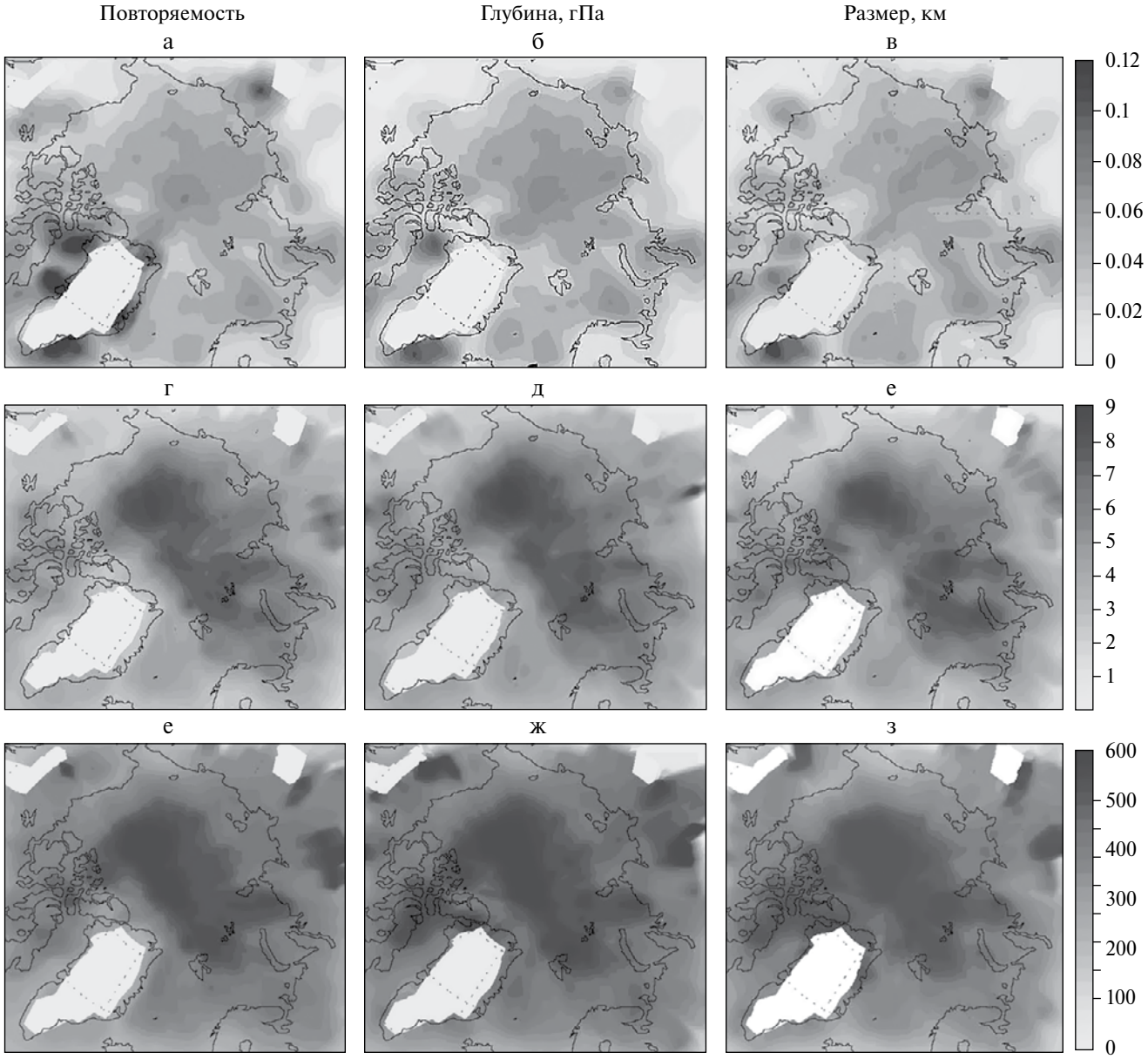

Рис. 5. Средние пространственные распределения разных характеристик летних арктических циклонов для 2000–2009 гг. – повторяемости (а–в), глубины (г–е), размеров (ж–и); по расчетам с РКМ (а, г, ж), по данным ERA-Interim (б, д, з) и по данным ASR (в, е, и).

Acknowledgments. This study was supported by the Russian Ministry of Education and Science, agreement № 14.616.21.0082 (RFMEFI61617X0082).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. *Акперов М.Г., Мохов И.И.* Сравнительный анализ методов идентификации внетропических циклонов // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2010. Т. 46. № 5. С. 620–637.
2. *Акперов М.Г., Мохов И.И.* Оценки чувствительности циклонической активности в тропосфере внетропических широт к изменению температурного режима // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2013. Т. 49. № 2. С. 129–136.
3. *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 // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2007. Т. 43. № 6. С. 764–772.
4. *Алексеев Г.В.* Арктическое измерение глобального потепления // Лёд и снег. 2014. № 2 (126). С. 53–68.

5. *Голицын Г.С., Мохов И.И., Акперов М.Г., Бардин М.Ю.* Функции распределения вероятности для циклонов и антициклонов в период 1952–2000 гг.: инструмент для определения изменений глобального климата // Докл. АН. 2007. Т. 413. № 2. С. 254–256.

6. Метеорологические и геофизические исследования // Серия: "Вклад России в Международный полярный год 2007/08" / Под ред. Г.В. Алексеева. М.: Paulsen, 2011. 352 с.

7. *Мохов И.И.* Современные изменения климата Арктики // Вестн. РАН. 2015. Т. 85. № 5–6. С. 478–484.

8. *Мохов И.И., Акперов М.Г., Лагун В.Е., Луценко Э.И.* Интенсивные арктические мезоциклоны // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2007. Т. 43. № 3. С. 291–297.

9. *Мохов И.И., Мохов О.И., Петухов В.К.*, Хайруллин Р.Р. Влияние глобальных климатических изменений на вихревую активность в атмосфере // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 1992. Т. 28. № 1. С. 11–26.

10. *Мохов И.И., Мохов О.И., Петухов В.К., Хайруллин Р.Р.* О влиянии облачности на вихревую активность атмосферы при изменениях климата // Метеорология и гидрология. 1992. № 1. С. 5–11.

11. *Мохов И.И., Семенов В.А., Хон В.Ч., Погарский Ф.А.* Изменения распространения морских льдов в арктике и связанные с ними климатические эффекты: диагностика и моделирование // Лёд и снег. 2013. № 2(122). С. 53–62.

12. *Akperov M., Mokhov I. I., Rinke A., Dethloff K., and 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. 122(1). P. 85–96.

13. *Bromwich D.H., Hines K.M., and Bai L.-S.* Development and testing of Polar WRF: 2. Arctic Ocean // J. Geophys. Res. 2009. Vol. 114. D08122. DOI:10.1029/2008JD010300.

14. *Dethloff K., Rinke A., Lehmann R., Christensen J.H., Botzet M., and Machenhauer B.* Regional climate model of the Arctic atmosphere // J. of Geophys. Res. 1996. Vol. 101D(18). Pp. 23401–23422. DOI: 10.1029/96JD02016.

15. *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.J., Haimberger L., Healy S.B., Hersbach H., Hólm E.V., Isaksen L., Kållberg P.W., Köhler M., Matricardi M., McNally A.P., Monge-Sanz B.M., Morcrette J.-J., Peubey C., De Rosnay P., Tavolato C., Thepaut J.-N., and Vitart F.* The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system // Q. J.R. Meteorol. Soc. 2011. Vol. 137. P. 553–597.

16. *Neu U., Akperov M.G., Benestad R., Blender R., Caballero R., Cocozza A., Dacre H., Feng Y., Grieger J., Gulev S., Hanley J., Hewson T., Hodges K., Inatsu M., Keay K., Kew S.F., Kindem I., Leckebusch G.C., Liberato M., 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., and Xia L.* IMILAST – a community effort to intercompare cyclone detection and tracking algorithms: quantifying method-related uncertainties // Bull. Amer. Meteorol. Soc. 2013. Vol. 94(4). P. 529–547.

17. *Pithan F. and Mauritsen T.* Arctic amplification dominated by temperature feedbacks in contemporary climate models // Nature Geoscience. 2014. Vol. 7. P. 181–184.

18. Polar Lows / Rasmussen E. and J. Turner (Ed.). Cambridge: Univ. Press, 2003. P. 612.

19. *Shkolnik I.M. and Efimov S.V.* Cyclonic activity in high latitudes as simulated by a regional atmospheric climate model: added value and uncertainties // Environ. Res. Lett. 2013. Vol. 8. 045007, DOI:10.1088/1748-9326/8/4/045007.

20. *Simmonds I., Burke C., and Keay K.* Arctic climate change as manifest in cyclone behavior // J. Climate. 2008. Vol. 21. P. 5777–5796.

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 algorithm? // Meteorologische Zeitschrift. 2013. Vol. 22. No. 1. P. 61–68.

22. *Uppala S.M., Kållberg P.W., Simmons A.J., Andrae U., da Costa Bechtold V., Fiorino M., Gibson J.K., Haseler J., Hernandez A., Kelly G.A., Li X., Onogi K., Saarinen S., Sokka N., Allan R.P., Andersson E., Arpe K., Balmaseda M.A., Beljaars A.C.M., van de Berg L., Bidlot J., Bormann N., Caires S., Chevallier F., Dethof A., Dragosavac M., Fisher M., Fuentes M., Hagemann S., Hólm E., Hoskins B.J., Isaksen L., Janssen P.A.E.M., Jenne R., McNally A.P., Mahfouf J.-F., Morcrette J.-J., Rayner N.A., Saunders R.W., Simon P., Sterl A., Trenberth K.E., Untch A., Vasiljevic D., Viterbo P., and Woollen J.* The ERA-40 re-analysis // Quart. J.R. Meteorol. Soc. 2005. Vol. 131. P. 2961–3012.

23. *Von Storch H., Langenberg H., and Feser F.* A spectral nudging technique for dynamical downscaling purposes // Mon. Weather. Rev. 2000. Vol. 128. P. 3664–3673.

REFERENCES

1. Akperov M.G., Mokhov I.I. A comparative analysis of the method of extratropical cyclone identification. *Izv., Atmos. Ocean. Phys.*, 2010, vol. 46, no. 5, pp. 620–637.
2. 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. *Izv., Atmos. Ocean. Phys.*, 2013, vol. 49, no. 2, pp. 129–136.
3. 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. *Izv., Atmos. Ocean. Phys.*, 2007, vol. 43, no. 6, pp. 764–772.
4. Alekseev G.V. Arctic dimension of global warming. *Ice and Snow*, 2014, vol. 54, no. 2, pp. 53–68. (In Russ.).
5. Golitsyn G.S., Mokhov I.I., Akperov M.G., Bardin M. Yu. Distribution functions of probabilities of cyclones and anticyclones from 1952 to 2000: an instrument for the determination of global climate variations. *Dokl. Earth Sci.*, 2007, vol. 413, no. 2, pp. 254–256.
6. *Meteorologicheskie i geofizicheskie issledovaniya. Seriya: «Vklad Rossii v Mezdunarodnyi polarnyi god 2007/08»* [Meteorological and Geophysical Research. Series: "Russia's Contribution to the International Polar Year 2007/08"]. Alekseev G.V., Ed. Moscow: Paulsen Publ., 2011. 352 p.
7. Mokhov I.I. Contemporary Climate Changes in the Arctic. *Herald Russ. Acad.f Sci.*, 2015, vol. 85, no. 5–6, pp. 478–484.
8. Mokhov I.I., Akperov M.G., Lagun V.E., Lutsenko E.I. Intense Arctic mesocyclones. *Izv., Atmos. Ocean. Phys.*, 2007, vol. 43, no. 3, pp. 291–297.
9. Mokhov I.I., Mokhov O.I., Petukhov V.K., Khayrullin R.R. Effect of global climatic changes on the cyclonic activity in the atmosphere. *Izv., Atmos. Ocean. Phys.*, 1992, vol. 28, no. 1, pp. 11–26.
10. Mokhov I.I., Mokhov O.I, Petoukhov V.K., Khairullin R.R. On the influence of cloudiness on vortex activity in the atmosphere during climate change. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 1992, no. 1, pp. 5–11.
11. Mokhov I.I., Semenov V.A., Khon V.C., Pogarsky F.A. Change of sea ice content in the Arctic and the associated climatic effects: detection and simulation. *Ice and Snow*, 2013, no. 2(122), pp. 53–62, DOI:10.15356/2076-6734-2013-2-53-62.
12. 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. *Theor. Appl. Climat.*, 2015, vol. 122, no. 1, pp. 85–96.
13. Bromwich D.H., Hines K.M., Bai L.-S. Development and testing of Polar WRF: 2. Arctic Ocean. *J. Geophys. Res.*, 2009, vol. 114, no. D08122, DOI:10.1029/2008JD010300.
14. Dethloff K., Rinke A., Lehmann R., Christensen J.H., Botzet M., Machenhauer B. Regional climate model of the Arctic atmosphere. *J. Geophys. Res.*, 1996, vol. 101D, no. 18, pp. 23401–23422.
15. Dee D.P., Uppala S.M., Simmons A.J., Berrisford P., et al. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. *Quart. J.R. Meteorol. Soc.*, 2011, vol. 137, pp. 553–597.
16. Neu U., Akperov M.G., Benestad R., et al. IMILAST – a community effort to intercompare cyclone detection and tracking algorithms: quantifying method-related uncertainties. *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, 2013, vol. 94, no. 4, pp. 529–547.
17. Pithan F., Mauritsen T. Arctic amplification dominated by temperature feedbacks in contemporary climate models. *Nature Geoscience*, 2014, vol. 7, pp. 181–184.
18. *Polar Lows.* Rasmussen E., Turner J., Eds. Cambridge University Press, 2003. 612 p.
19. Shkolnik I.M., Efimov S.V. Cyclonic activity in high latitudes as simulated by a regional atmospheric climate model: added value and uncertainties. *Environ. Res. Lett.*, 2013, vol. 8. 045007, DOI: 10.1088/1748–9326/8/4/045007.
20. Simmonds I., Burke C., Keay K. Arctic climate change as manifest in cyclone behavior. *J. Climate*, 2008, vol. 21, pp. 5777–5796.
21. Ulbrich U., Leckebusch G.C., Grieger J., et al. Are Greenhouse Gas Signals of Northern Hemisphere winter extra-tropical cyclone activity dependent on the identification and tracking algorithm? *Meteorologische Zeitschrift*, 2013, vol. 22, no. 1, pp. 61–68.
22. Uppala S.M., Kållberg P.W., Simmons A.J., et al. The ERA-40 re-analysis. *Quart. J.R. Meteorol. Soc.*, 2005. vol. 131, pp. 2961–3012.
23. von Storch H., Langenberg H., Feser F. A spectral nudging technique for dynamical downscaling purposes. *Mon. Weather. Rev.*, 2000, vol. 128, pp. 3664–3673.