

Гидрометеорология и экология. 2025. № 78. С. 7—19.
Hydrometeorology and Ecology. 2025;(78):7—19.

МЕТЕОРОЛОГИЯ

Научная статья
УДК [551.515.1:551.515.6:004.9](99)
doi: 10.33933/2713-3001-2025-78-7-19

Мезомасштабные полярные циклоны над Антарктикой по данным реанализа ERA5

***Павел Андреевич Голубкин^{1, 2}, Всеволод Сергеевич Коляда²,
Юлия Ефимовна Смирнова²***

¹ Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия,
pgolubkin@gmail.com

² Научный фонд «Международный центр по окружающей среде и дистанционному зондированию имени Нансена», Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Статья посвящена оценке пространственно-временного распределения и характеристик мезомасштабных полярных циклонов над Антарктикой за период 2000—2020 гг. Детектирование и трекинг циклонов проводились с использованием автоматического алгоритма на основе спектрально фильтрованных полей относительной завихренности на уровне 850 гПа атмосферного реанализа ERA5. Выявлено 34 038 циклонов, из которых 2 650 отнесены к наиболее интенсивным на основе порогового значения относительной завихренности. Межгодовая изменчивость общего количества циклонов выражена слабо, но для наиболее интенсивных циклонов наблюдаются значительные колебания. Основные районы циклонической активности сосредоточены над морями Беллинсгаузена и Амундсена, над морем Росса выявлен регион со значимым трендом увеличения количества циклонов. Рассчитаны распределения обнаруженных циклонов по основным параметрам: время существования, пройденное расстояние и средняя скорость передвижения.

Ключевые слова: мезомасштабные полярные циклоны, Антарктика, атмосферный реанализ, ERA5

Благодарности: работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и ННФИ в рамках научного проекта № 20-55-56051.

Для цитирования: Голубкин П. А., Коляда В. С., Смирнова Ю. Е. Мезомасштабные полярные циклоны над Антарктикой по данным реанализа ERA5 // Гидрометеорология и экология. 2025. № 78. С. 7—19. doi: 10.33933/2713-3001-2025-78-7-19.

Original article

Antarctic polar mesoscale cyclones based on ERA5 reanalysis data

Pavel A. Golubkin^{1,2}, *Vsevolod S. Kolyada*², *Julia E. Smirnova*²

¹ St. Petersburg University, St. Petersburg, Russia

² Nansen International Environmental and Remote Sensing Centre, St. Petersburg, Russia

Summary. In this study the spatio-temporal variability and key parameters of Antarctic polar mesoscale cyclones were analyzed for the period 2000—2020. Detection and tracking of cyclones were performed based on the 850 hPa relative vorticity fields from the ERA5 atmospheric reanalysis. These fields were filtered at T40—T100 spectral resolution to focus on scales typical for polar mesocyclone. The utilized automated tracking algorithm used 3-hourly fields to detect cyclones based on the magnitude of relative vorticity, with a base threshold of $-3 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ and a stricter threshold of $-6 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ to distinguish more intense cyclones. In total, 34038 polar mesoscale cyclones were identified, with 2650 classified as most intense based on the stricter threshold. Results indicate small interannual variability in the total number of cyclones, but considerably higher variability for the most intense cases. Most of the identified cyclones formed during the summer and autumn seasons. Relative to the overall distribution, more intense cyclones formed during winter season, which is most likely due to the stronger air-sea temperature contrast, which is required for intensification. The main identified regions of high cyclonic activity are the Bellingshausen and Amundsen Seas. A statistically significant positive trend in cyclone numbers was observed over the Ross Sea. Distributions of the detected cyclones by their main parameters, such as lifetime, distance travelled, and mean translation velocity were derived. Considering all identified cyclones, the mean lifetime is 16 hours, the mean distance travelled is 487 km, and the mean translation velocity is 8.7 m/s. The most intense cyclones exhibit higher mean values, i.e., 28 hours, 869 km, and 9.2 m/s for the lifetime, distance travelled, and translation velocity, respectively.

Keywords: polar mesoscale cyclone, polar low, Antarctic, atmospheric reanalysis, ERA5.

Acknowledgments: the reported study was funded by RFBR and INSF, project number 20-55-56051.

For citation: Golubkin P. A., Kolyada V. S., Smirnova J. E. Antarctic polar mesoscale cyclones based on ERA5 reanalysis data. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2025;(78):(7—19). doi: 10.33933/2713-3001-2025-78-7-19. (In Russ.).

Введение

Мезомасштабные полярные циклоны (МПЦ) являются атмосферными вихрями, которые наблюдаются в высоких широтах обоих полушарий Земли. Наиболее интенсивные из таких вихрей, называемые полярными циклонами (англ., polar lows), являются опасными явлениями, которые могут представлять угрозу для морской деятельности и прибрежных сооружений за счет развиваемых ими штормовых значений скорости ветра и высот волн [1].

Большая часть посвященных МПЦ работ исследует системы Северного полушария, чаще всего района Северо-Европейского бассейна, где наблюдается их наибольшая активность [2], и о котором существует ряд климатологических работ [3—8]. О пространственно-временном распределении МПЦ над Антарктикой известно меньше. Ряд ранних исследований 1990-х годов носил региональный

характер и основывался на использовании спутниковых инфракрасных снимков — основного инструмента для идентификации МПЦ и в настоящее время. Но промежутки между последовательными снимками в те годы могли быть слишком велики для отслеживания траекторий и характеристик МПЦ со временем существования, не превышающим 12—24 часа [9—11]. В более новой работе [12] проведен визуальный анализ спутниковых снимков для всей Антарктики, но только для периода, составляющего четыре месяца, что связано с высокой трудоемкостью процесса.

Другим типом работ являются исследования, основывающиеся на данных атмосферных реанализов или оперативных атмосферных моделей [13—15]. Такие данные предоставляют возможность проведения исследований для достаточно длинного временного периода для всей Антарктики. Однако за счет их относительно низкого пространственного разрешения (от $0,5^\circ \times 0,5^\circ$ и ниже) существенная часть мезомасштабных циклонов, размер которых может не превышать 200—300 км, в таких данных может быть не воспроизведена. В связи с этим использование данных актуального атмосферного реанализа с улучшенным пространственным разрешением European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) ReAnalysis 5 (ERA5) может дать более точные оценки циклонической активности над антарктическим регионом.

Целью данной работы является оценка пространственно-временного распределения и характеристик мезомасштабных полярных циклонов над Антарктикой за период 2000—2020 гг.

Исходные данные и методология

Исследование проводилось для антарктического региона с северной границей на 55° ю.ш. (рис. 1). Были использованы данные атмосферного реанализа ERA5 с пространственным разрешением $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ [16]. Для детектирования циклонов использовались поля относительной завихренности на уровне 850 гПа. С целью исключения мелкомасштабного шума и систем синоптического масштаба предварительно проводилась спектральная фильтрация полей. Для этого исходные поля относительной завихренности были разложены через спектральные коэффициенты ψ_n^m и сферические гармоники $P_n^m(\mu)e^{im\lambda}$:

$$\psi(\lambda, \mu) = \sum_{m=-M}^M \sum_{n=|m|}^{N(m)} \psi_n^m P_n^m(\mu) e^{im\lambda},$$

где $\psi(\lambda, \mu)$ — исходное поле; λ — долгота; $\mu = \sin\varphi$, где φ — широта, n и m — степень и порядок сферических функций; P_n^m — присоединенный полином Лежандра. Далее поля были синтезированы с использованием спектральных коэффициентов со степенями сферических функций от 40 до 100, то есть со спектральным разрешением T40—T100, приблизительно соответствующим пространственной фильтрации 200—500 км. Процедура фильтрации полей относительной завихренности соответствует используемой в работе [17], где она описана более подробно.

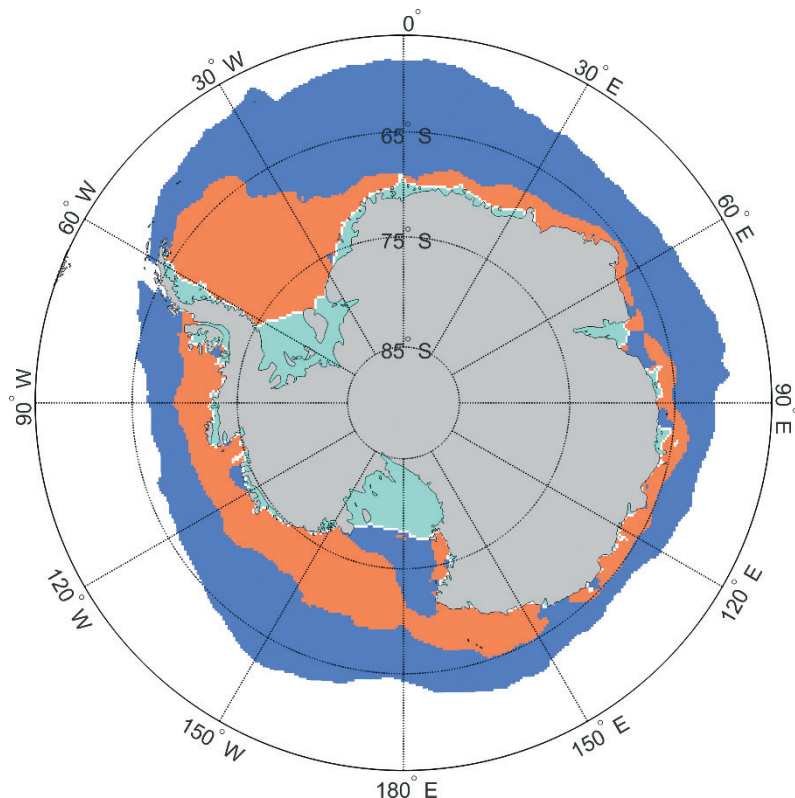


Рис. 1. Регион исследования.

Голубым цветом обозначены ледники, красным (синим) — медианное распространение ледяного покрова в летний (зимний) период за 2000—2020 гг.

Fig. 1. The study region.

Cyan color denotes glaciers, red (blue) color denotes median summer (winter) sea ice extent for 2000—2020.

Отфильтрованные поля относительной завихренности на уровне 850 гПа с временным разрешением 3 часа использовались для детектирования мезомасштабных циклонов с помощью автоматического алгоритма. Для каждого поля (временного шага) алгоритм включал нахождение локальных минимумов относительной завихренности со значениями ниже -3×10^{-5} 1/с, соответствующих центрам циклонов. После нахождения локальных минимумов на каждом последующем временном шаге проводилось сопоставление их местоположений с найденными на предыдущем временном шаге. При наличии найденного центра на следующем временном шаге на расстоянии не более 216 км от предыдущего (соответствует максимально допустимой скорости передвижения 20 м/с) трек циклона продлевался, а при его отсутствии — завершался. При работе алгоритма для включения случаев в итоговую базу были установлены следующие критерии:

максимальное время существования циклона — не более 5 суток, не более 2 суток нахождения над морским льдом или материком, минимальное время существования над свободной ото льда морской поверхностью — не менее 6 часов. Первые два критерия не оказали существенного влияния на результаты ввиду малого количества подобных случаев. Так, время существования, превышающее 4 суток, отмечено лишь в 6 случаях, в 84 % случаев — нет ни одного временного шага над морским льдом или материком, а в 95 % случаев — время нахождения над ними не превышает 12 ч.

Результаты и их обсуждение

Всего с использованием описанного выше метода было обнаружено 34038 мезомасштабных циклонов. Из них 2650 достигли за время своего существования значения отфильтрованной относительной завихренности на уровне 850 гПа ниже чем -6×10^{-5} 1/с хотя бы на одном временном шаге. Для краткости далее по тексту подобные случаи называются наиболее интенсивными МПЦ, и результаты приводятся как по всем случаям в целом, так и по таким случаям отдельно.

На рис. 2 представлено распределение обнаруженных МПЦ по годам. Среднее количество циклонов в год составило 1621. Межгодовая изменчивость выражена достаточно слабо и составляет около 10 % от среднего количества циклонов в год. В четырех из пяти последних лет исследуемого периода наблюдаются максимальные значения количества формирующихся циклонов. Схожее распределение наблюдается и для наиболее интенсивных МПЦ (рис. 2 б), однако их межгодовая изменчивость выражена сильнее, примерно до 30—40 % от среднего количества циклонов в год, которое составляет 126.

Распределение обнаруженных циклонов по месяцам их формирования представлено на рис. 3. Наиболее часто мезоциклоны формируются в марте, в этом

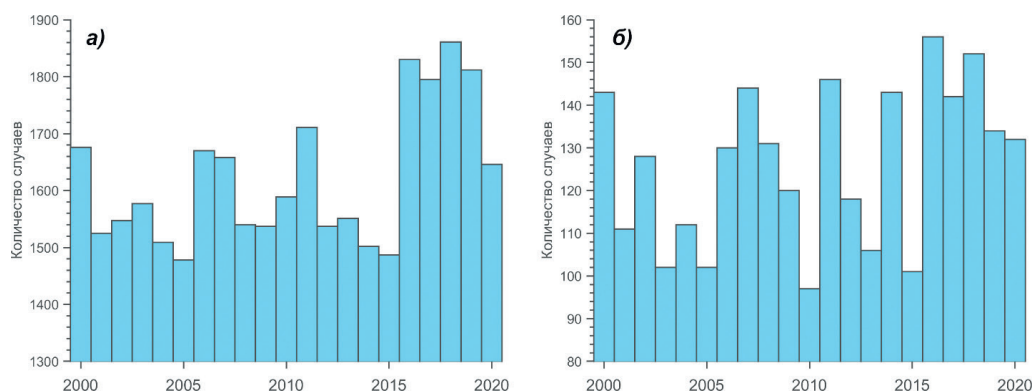


Рис. 2. Распределение обнаруженных МПЦ по годам.

a — для всех случаев, *б* — для наиболее интенсивных циклонов.

Fig. 2. Distribution of detected mesocyclones by years.

a — for all cases, *б* — for most intense cyclones.

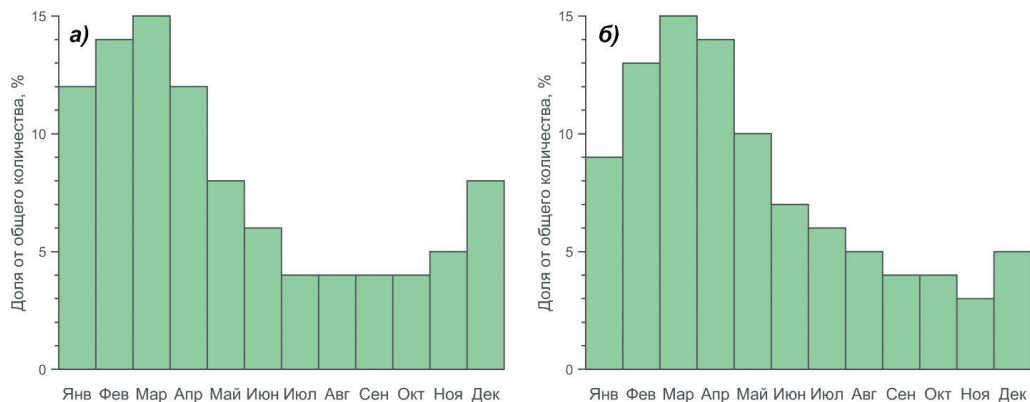


Рис. 3. Распределение обнаруженных МПЦ по месяцам.
а — для всех случаев, *б* — для наиболее интенсивных циклонов.

Fig. 3. Distribution of detected mesocyclones by months.
a — for all cases, *b* — for most intense cyclones.

месяце наблюдается около 15 % всех случаев. Большая часть случаев наблюдается в летний (декабрь—февраль, 35 %) и осенний (март—май, 36 %) периоды, что, вероятно, связано с существенно большей доступной свободной ото льда площадью акватории. Известно, что наиболее интенсивные мезомасштабные циклоны наблюдаются преимущественно в зимний период, поскольку для формирования и развития им необходим большой контраст между температурами воздуха и поверхности океана [1]. Этим может объясняться уменьшение количества в летний период и увеличение в зимний для наиболее интенсивных МПЦ, рассматриваемых в данной работе (рис. 3 б).

На рис. 4 показано пространственное распределение траекторий обнаруженных циклонов как количество пересечений ячеек сетки 100×100 км за год. Наблюдается ряд очагов повышенной циклонической активности со значениями до 10 циклонов в год, находящихся на некотором удалении от материка, и местоположение которых, в среднем, хорошо соотносится с положением контуров медианного распространения ледяного покрова (рис. 1). При этом в западной части региона активность выше, чем в восточной. Наиболее выраженные максимумы циклонической активности находятся над морями Беллингаузена и Амундсена. При рассмотрении наиболее интенсивных МПЦ отдельно результаты схожи, большая часть очагов сохраняется, хотя и менее выражена, но некоторые очаги отсутствуют, что свидетельствует о том, что в этих районах проходит много мезоциклонов, но практически все они незначительны. Максимальный пик активности наиболее интенсивных МПЦ находится над морем Беллингаузена.

На рис. 5 отображены тренды изменения количества траекторий мезомасштабных циклонов в ячейках сетки 500×500 км. На большей части региона отмечаются положительные тренды, которые в большинстве случаев статистически незначимы. Наибольший район с максимальными и значимыми трендами

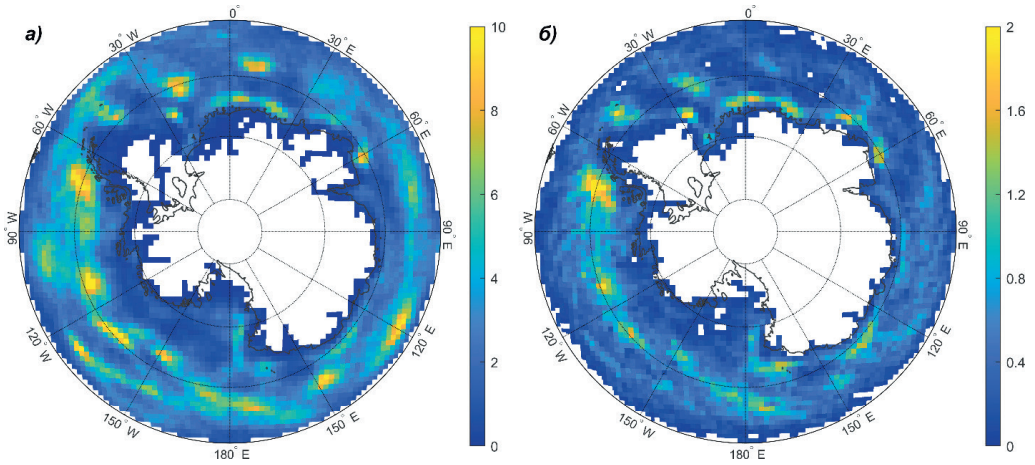


Рис. 4. Пространственное распределение обнаруженных МПЦ. Цветом показано количество пересечений ячеек размером 100×100 км траекториями МПЦ в год.

a — для всех случаев, *b* — для наиболее интенсивных циклонов.

Fig. 4. Spatial distribution of detected mesocyclones. Color represents the number of mesocyclone tracks which cross 100×100 km grid cells per year.

a — for all cases, *b* — for most intense cyclones.

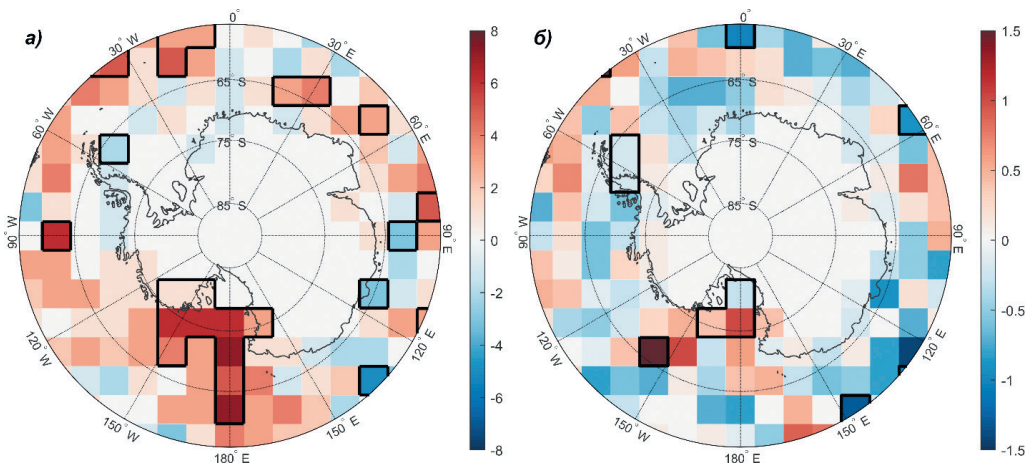


Рис. 5. Тренды изменения количества траекторий МПЦ (единиц за декаду), пересекающих ячейки сетки размером 500×500 км. Черным рамками отмечены ячейки, тренды в которых статистически значимы на уровне, превышающем 95 %.

a — для всех случаев, *b* — для наиболее интенсивных циклонов.

Fig. 5. Trends in the number mesocyclone tracks crossing 500×500 grid cells (number per decade). Framed grid cells represent statistically significant trends with a level exceeding 95 %.

a — for all cases, *b* — for most intense cyclones.

к увеличению количества циклонов находится над морем Росса, где их значения составляют до плюс 4—8 случаев за декаду.

Для наиболее интенсивных МПЦ большая часть наблюдаемых трендов отрицательна, но практически все они статистически незначимы. Несколько ячеек со значимыми отрицательными трендами находится в северных широтах, где количество интенсивных МПЦ мало (рис. 4 б). Небольшой район значимых положительных трендов находится над морем Росса и между морями Росса и Амундсена, где значения тренда составляют до плюс 1—1,5 случаев за декаду.

Распределение обнаруженных циклонов по времени существования представлено на рис. 6. Время существования большинства случаев (85 %) не превышало 1 суток, среднее время существования составляет около 16 часов. Для наиболее интенсивных МПЦ время существования значительно выше, их среднее значение составляет около 28 часов, причем только половина существовала не более 1 суток.

Малое время существования обнаруженных циклонов отображается и в небольшом пройденном ими расстоянии, в 63 % случаев оно составляет менее 500 км (рис. 7). Расстояние более 1000 км прошли лишь около 9 % циклонов. Среднее значение составило 487 км. Для наиболее интенсивных случаев среднее значение также выше и составляет 869 км, только 24 % таких циклонов прошли менее 500 км и 33 % — более 1000 км.

На рис. 8 представлено распределение обнаруженных циклонов по средней скорости передвижения. Наиболее характерные скорости составляют от 4 до 10 м/с, максимальные — до 20 м/с. Среднее значение составило 8,7 м/с. Наиболее интенсивные МПЦ передвигаются несколько быстрее — их средняя скорость составила 9,2 м/с. В остальном их распределение схоже с представленным для всех случаев.

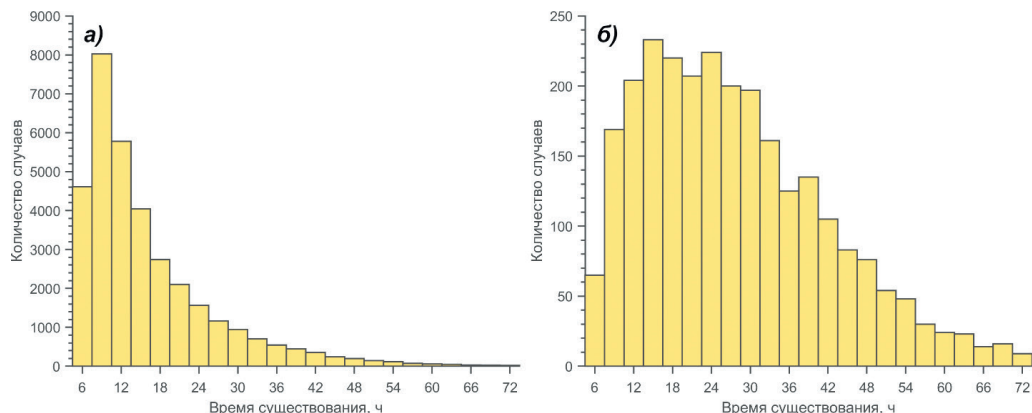


Рис. 6. Распределение обнаруженных МПЦ по времени существования.

а — для всех случаев, *б* — для наиболее интенсивных циклонов.

Fig. 6. Distribution of detected mesocyclones by lifetime.

a — for all cases, *b* — for most intense cyclones.

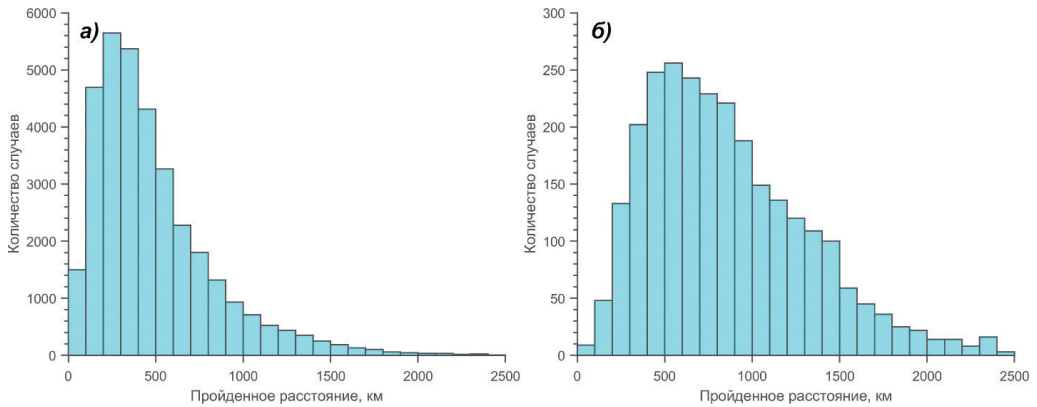


Рис. 7. Распределение обнаруженных МПЦ по пройденному расстоянию.

a — для всех случаев, *b* — для наиболее интенсивных циклонов.

Fig. 7. Distribution of detected mesocyclones by distance traveled.

a — for all cases, *b* — for most intense cyclones.

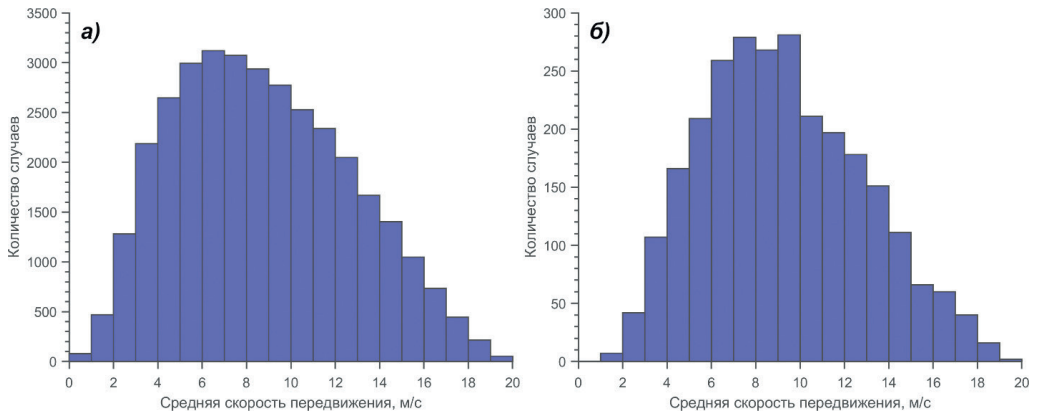


Рис. 8. Распределение обнаруженных МПЦ по средней скорости передвижения.

a — для всех случаев, *b* — для наиболее интенсивных циклонов.

Fig. 8. Distribution of detected mesocyclones by mean translation velocity.

a — for all cases, *b* — for most intense cyclones.

Заключение

В работе исследовалось пространственно-временное распределение и характеристики морских мезомасштабных полярных циклонов над Антарктикой за период 2000—2020 гг. Для этой цели использовались данные атмосферного реанализа ERA5. Циклоны находились в полях относительной завихренности на уровне 850 гПа, предварительно отфильтрованных со спектральным разрешением T40—T100. Детектирование и трекинг циклонов в таких полях осуществлялся с использованием автоматического алгоритма.

Всего за период исследования было найдено 34038 мезомасштабных полярных циклонов с использованием порогового критерия отфильтрованной относительной завихренности на уровне 850 гПа со значением -3×10^{-5} 1/с. Из них 2650 циклонов были выделены как наиболее интенсивные за счет того, что за время их существования были достигнуты значения относительной завихренности ниже, чем -6×10^{-5} 1/с. Межгодовая изменчивость количества всех циклонов составила около 10 %, а наиболее интенсивных — до 40 %. Большая часть найденных циклонов формировалась в летний и осенний периоды, что, вероятно, связано с существенно большей площадью свободной ото льда акватории в эти периоды. По сравнению с распределением, полученным для всех случаев, при рассмотрении наиболее интенсивных циклонов отдельно можно отметить, что доля циклонов, образующихся в зимний период, больше, что объясняется наличием больших контрастов между температурами воды и воздуха, необходимых для интенсификации циклонов.

Показано, что в западной части региона количество мезомасштабных циклонов больше, чем в восточной. Основные максимумы циклонической активности находятся над морями Беллингаузена и Амундсена. Для наиболее интенсивных МПЦ обнаружен основной максимум активности над морем Беллингаузена. Схожие районы максимальной активности циклонов отмечались ранее и в предыдущих работах [12, 14].

При анализе трендов изменения количества циклонов для различных регионов был выявлен ряд районов с положительными, но в большинстве случаев статистически незначимыми трендами. Основной район со значимыми величинами трендов до плюс 8 случаев за декаду расположен над морем Росса. В этом же районе, но меньше по площади, выявлены области со значимыми положительными трендами со значениями до 1,5 случаев за декаду и для наиболее интенсивных случаев.

Большая часть (85 %) из всех обнаруженных циклонов просуществовала не более 1 суток. Среднее время существования составило около 16 часов. Наиболее интенсивные случаи в среднем продолжались дольше — 28 часов. Среднее пройденное циклонами за время своего существования расстояние составило 487 км (869 км для наиболее интенсивных). Максимальная скорость передвижения обнаруженных циклонов составляет до 20 м/с, наиболее характерны значения от 4 до 10 м/с, среднее — 8,7 м/с (9,2 м/с для наиболее интенсивных).

В работе исследован достаточно длинный временной период, составляющий 21 год, но в последующих работах он может быть еще существенно продлен, в частности, данные реанализа ERA5 в настоящее время доступны с 1940 г. и регулярно обновляются. Кроме того, интерес для дальнейших исследований может представлять определение связи между количеством формирующихся мезомасштабных циклонов и значениями индексов антарктического и других климатических колебаний.

Список литературы

1. Rasmussen E. A., Turner J. Polar Lows: Mesoscale Weather Systems in the Polar Regions; Cambridge. UK. 2003. 612 p. doi: 10.1017/CBO9780511524974.

2. Stoll P., Graversen R. G., Noer G., et al. An objective global climatology of polar lows based on reanalysis data // *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 2018. Vol. 144(716). P. 2099—2117. doi: 10.1002/qj.3309.
3. Harold J. M., Bigg G. R., Turner J. Mesocyclone activity over the North-East Atlantic. Part 1: vortex distribution and variability // *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*. 1999. Vol. 19(11). P. 1187—1204. doi: 10.1002/(SICI)1097-0088(199909)19:11<1187::AID-JOC419>3.0.CO;2-Q.
4. Noer G., Saetra Ø., Lien T., et al. Aclimatological study of polar lows in the Nordic Seas // *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 2011. Vol. 137(660). P. 1762—1772. doi: 10.1002/qj.846.
5. Rojo M., Claud C., Mallet P.-E., et al. Polar low tracks over the Nordic Seas: A 14-winter climatic analysis // *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*. 2015. Vol. 67(1). P. 24660. doi: 10.3402/tellusa.v67.24660.
6. Smirnova J., Golubkin P., Bobylev P., et al. Polar low climatology over the Nordic and Barents seas based on satellite passive microwave data // *Geophysical Research Letters*. 2015. Vol. 42(13). P. 5603—5609. doi: 10.1002/2015GL063865.
7. Michel C., Terpstra A., Spengler T. Polar mesoscale cyclone climatology for the Nordic Seas based on ERA-Interim // *Journal of Climate*. 2018. Vol. 31(6). P. 2511—2532. doi: 10.1175/JCLI-D-16-0890.1.
8. Golubkin P., Smirnova J., Bobylev L. Satellite-derived spatio-temporal distribution and parameters of North Atlantic polar lows for 2015—2017 // *Atmosphere*. 2021. Vol. 12(2). P. 224. doi: 10.3390/atmos12020224.
9. Heinemann G. Mesoscale vortices in the Weddell Sea region (Antarctica) // *Monthly Weather Review*. 1990. Vol. 118(3). P. 779—793. doi: 10.1175/1520-0493(1990)118<0779:MVITWS>2.0.CO;2.
10. Carrasco J. F., Bromwich D. H. Mesoscale cyclogenesis dynamics over the southwestern Ross Sea, Antarctica // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 1993. Vol. 98(D7). P. 12973—12995. doi: 10.1029/92JD02821.
11. Carleton A. M., Song Y. Synoptic climatology, and intrahemispheric associations, of cold air mesocyclones in the Australasian sector // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 1997. Vol. 102(D12). P. 13873—13887. doi: 10.1029/96JD03357.
12. Verezhenskaya P., Tilinina N., Gulev S., et al. Southern Ocean mesocyclones and polar lows from manually tracked satellite mosaics // *Geophysical Research Letters*. 2017. Vol. 44(15). P. 7985—7993. doi: 10.1002/2017GL074053.
13. Uotila P., Pezza A. B., Cassano J. J., et al. A comparison of low pressure system statistics derived from a high-resolution NWP output and three reanalysis products over the Southern Ocean // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2009. Vol. 114(D17). doi: 10.1029/2008JD011583.
14. Irving D., Simmonds I., Keay K. Mesoscale cyclone activity over the ice-free Southern Ocean: 1999—2008 // *Journal of Climate*. 2010. Vol. 23(20). P. 5404—5420. doi: 10.1175/2010JCLI3628.1.
15. Pezza A., Sadler K., Uotila P., et al. Southern Hemisphere strong polar mesoscale cyclones in high-resolution datasets // *Climate Dynamics*. 2016. Vol. 47. P. 1647—1660. doi: 10.1007/s00382-015-2925-2.
16. Hersbach H., Bell B., Berrisford P., et al. The ERA5 global reanalysis // *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 2020. Vol. 146(730). P. 1999—2049. doi: 10.1002/qj.3803.
17. Смирнова Ю. Е., Голубкин П. А. Оценка доли полярных циклонов, воспроизводимых атмосферными реанализами, с использованием различных наборов данных. *Проблемы Арктики и Антарктики*, 2017. Т. 1. С. 97—108. doi: 10.30758/0555-2648-2017-0-1-97-108.

References

1. Rasmussen E. A., Turner J. *Polar Lows: Mesoscale Weather Systems in the Polar Regions*; Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2003; 612 p. doi: 10.1017/CBO9780511524974.
2. Stoll P., Graversen R. G., Noer G., et al. An objective global climatology of polar lows based on reanalysis data. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 2018; 144(716): 2099—2117. doi: 10.1002/qj.3309.

3. Harold J. M., Bigg G. R., Turner J. Mesocyclone activity over the North-East Atlantic. Part 1: vortex distribution and variability. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*. 1999; 19(11): 1187—1204. doi: 10.1002/(SICI)1097-0088(199909)19:11<1187::AID-JOC419>3.0.CO;2-Q.
4. Noer G., Saetra Ø., Lien T., et al. Aclimatological study of polar lows in the Nordic Seas. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 2011; 137(660): 1762—1772. doi: 10.1002/qj.846.
5. Rojo M., Claud C., Mallet P.-E., et al. Polar low tracks over the Nordic Seas: A 14-winter climatic analysis. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*. 2015. 67(1): 24660. doi: 10.3402/tellusa.v67.24660.
6. Smirnova J., Golubkin P., Bobylev P., et al. Polar low climatology over the Nordic and Barents seas based on satellite passive microwave data. *Geophysical Research Letters*. 2015; 42(13): 5603—5609. doi: 10.1002/2015GL063865.
7. Michel C., Terpstra A., Spengler T. Polar mesoscale cyclone climatology for the Nordic Seas based on ERA-Interim. *Journal of Climate*. 2018; 31(6): 2511—2532. doi: 10.1175/JCLI-D-16-0890.1.
8. Golubkin P., Smirnova J., Bobylev, L. Satellite-derived spatio-temporal distribution and parameters of North Atlantic polar lows for 2015—2017. *Atmosphere*. 2021; 12(2): 224. doi: 10.3390/atmos12020224.
9. Heinemann G. Mesoscale vortices in the Weddell Sea region (Antarctica). *Monthly Weather Review*. 1990; 118(3): 779—793. doi: 10.1175/1520-0493(1990)118<0779:MVITWS>2.0.CO;2.
10. Carrasco J. F., Bromwich D. H. Mesoscale cyclogenesis dynamics over the southwestern Ross Sea, Antarctica. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 1993; 98(D7): 12973—12995. doi: 10.1029/92JD02821.
11. Carleton A. M., Song Y. Synoptic climatology, and intrahemispheric associations, of cold air mesocyclones in the Australasian sector. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 1997; 102(D12): 13873—13887. doi: 10.1029/96JD03357.
12. Verezemskaya P., Tilinina N., Gulev S., et al. Southern Ocean mesocyclones and polar lows from manually tracked satellite mosaics. *Geophysical Research Letters*. 2017; 44(15): 7985—7993. doi: 10.1002/2017GL074053.
13. Uotila P., Pezza A. B., Cassano J. J., et al. A comparison of low pressure system statistics derived from a high-resolution NWP output and three reanalysis products over the Southern Ocean. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2009; 114(D17). doi: 10.1029/2008JD011583.
14. Irving, D., Simmonds, I., Keay, K. Mesoscale cyclone activity over the ice-free Southern Ocean: 1999—2008. *Journal of Climate*. 2010; 23(20): 5404—5420. doi: 10.1175/2010JCLI3628.1.
15. Pezza A., Sadler K., Uotila P., et al. Southern Hemisphere strong polar mesoscale cyclones in high-resolution datasets. *Climate Dynamics*. 2016; 47: 1647—1660. doi: 10.1007/s00382-015-2925-2.
16. Hersbach H., Bell B., Berrisford P., et al. The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 2020; 146(730): 1999—2049. doi: 10.1002/qj.3803.
17. Smirnova J. E., Golubkin P. A. Estimating proportion of polar lows resolved by atmospheric reanalyses using different data sets. *Problemy Arktiki I Antarktiki = Problems of Arctic and Antarctic*. 2017; (1): (97—108). [In Russ]. doi: 10.30758/0555-2648-2017-0-1-97-108.

Информация об авторах

Голубкин Павел Андреевич, кандидат физ.-мат. наук, доцент кафедры океанологии Санкт-Петербургского государственного университета, научный сотрудник Научного фонда «Международный центр по окружающей среде и дистанционному зондированию имени Нансена», pgo1ubkin@gmail.com.

Коляда Всеволод Сергеевич, младший научный сотрудник Научного фонда «Международный центр по окружающей среде и дистанционному зондированию имени Нансена», jostersplus@gmail.com.

Смирнова Юлия Ефимовна, кандидат геогр. наук, научный сотрудник Научного фонда «Международный центр по окружающей среде и дистанционному зондированию имени Нансена», julia.smirnova@niersc.spb.ru.

Information about authors

Golubkin Pavel Andreevich, PhD (Phys. Math. Sci.), St. Petersburg University, Associate Professor and Nansen International Environmental and Remote Sensing Centre, Researcher.

Kolyada Vsevolod Sergeevich, Nansen International Environmental and Remote Sensing Centre, Junior Researcher.

Smirnova Julia Efimovna, PhD (Geogr. Sci.), Nansen International Environmental and Remote Sensing Centre, Researcher.

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 26.12.2024

Принята к печати после доработки 21.02.2025

The article was received on 26.12.2024

The article was accepted after revision on 21.02.2025