

УДК 551.513

## Полярные циклоны: наблюдения, реанализ, моделирование

*Е.С. Нестеров*

*Гидрометеорологический научно-исследовательский центр  
Российской Федерации, г. Москва, Россия  
nesterov@mecom.ru*

Дается обзор исследований полярных циклонов в Норвежском, Баренцевом и Карском морях. Установлено, что благоприятным условием для формирования полярных циклонов является вынос холодного воздуха на относительно теплую поверхность моря. Интенсификации полярного циклона способствуют потоки скрытого и явного тела на поверхности моря. Наиболее часто полярные циклоны возникают в области кромки льда и в прибрежных районах. В реанализе Arctic System Reanalysis полярные циклоны воспроизводятся более успешно, чем в реанализах ERA-Interim, MERRA и др. Перспективным является использование реанализа ERA 5, который заменил ERA-Interim.

*Ключевые слова:* полярные циклоны, наблюдения, реанализ, моделирование

**DOI:** <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2020-1-65-82>

## Polar cyclones: observations, reanalysis, modeling

*E.S. Nesterov*

*Hydrometeorological Research Center of Russian Federation, Moscow, Russia  
nesterov@mecom.ru*

A review of polar cyclone studies in the Norwegian, Barents and Kara seas is presented. It is found that a favorable condition for the polar cyclone formation is a cold air outbreak to a relatively warm sea surface. The intensification of polar cyclones is facilitated by the latent and sensible heat fluxes on the sea surface. Polar cyclones are most frequently generated at the ice edge and in the coastal areas. Polar cyclones are reproduced in the Arctic System Reanalysis more successfully than in the ERA-Interim, MERRA, and other reanalyses. The use of the ERA 5 reanalysis, which replaced the ERA-Interim, is promising.

*Keywords:* polar cyclones, observations, reanalysis, modeling

### Введение

Полярные циклоны (ПЦ), как правило, образуются в холодную часть года в высоких широтах. В частности, в Северном полушарии это Гренландское, Норвежское, Баренцево и Карское моря. Однако в последнее время полярные циклоны отмечены и в восточной части Арктики, в частности в море Лаптевых и в Восточно-Сибирском море [2, 4], что связывается с потеплением Арктики и уменьшением площади ледового покрова. Основными механизмами формирования ПЦ являются

термическая конвекция при перемещении холодной арктической воздушной массы на относительно теплую поверхность моря, бароклинная и баротропная неустойчивость. Интенсивные ПЦ сопровождаются штормовым ветром и волнением, обледенением судов и сооружений, ухудшением видимости. Скорость ветра может достигать 35 м/с [1, 3, 5–7].

Существует несколько определений полярного циклона. Одним из первых определение ПЦ было дано европейской рабочей группой по полярным циклонам в 1994 г.: «Термин “полярный мезомасштабный циклон” (полярный мезоциклон) – это общий термин для всех  $\alpha$ - и  $\beta$ -мезомасштабных циклонических вихрей к северу от главного полярного фронта (горизонтальный масштаб 20–2000 км). Термин “полярный циклон” должен использоваться для интенсивных морских мезоциклонов с масштабами до 1000 км и скоростью ветра в приповерхностном слое более 15 м/с» [20].

Схожее определение было дано позже в [35]: «Полярный циклон – это небольшой, но довольно интенсивный морской циклон, который формируется к северу от основной бароклиновой зоны (полярного фронта или другой основной бароклиновой зоны). Горизонтальный масштаб ПЦ примерно между 200 и 1000 км и скорость ветра в приповерхностном слое около или более 15 м/с».

К этим определениям иногда добавляется, что время жизни ПЦ составляет от нескольких часов до трех суток, а скорость перемещения достигает 40 км/ч [3, 5, 6, 43]. Проблемы, связанные с исследованием природы ПЦ и их прогнозированием, регулярно обсуждаются на заседаниях рабочих групп под эгидой Совместной комиссии по океанографии и морской метеорологии ВМО [20, 21, 43]. В рекомендациях подчеркивается важность расширения покрытия спутниковой информацией северных морей и увеличения ее разрешения. Необходимо дальнейшее улучшение прогнозов ПЦ. Отмечается, что хотя оперативные модели в настоящее время имеют пространственное разрешение в несколько километров, остаются проблемы с параметризацией конвективных процессов. Также рекомендуется провести сравнение технологий обнаружения и построения траекторий ПЦ.

Целью настоящей обзорной статьи является обобщение данных наблюдений за ПЦ, оценка качества отражения их характеристик в реанализах, сводка проблем, связанных с моделированием ПЦ.

### **Наблюдения за полярными циклонами**

Наблюдения ПЦ немногочисленны в связи с их коротким временем жизни, а траектории часто проходят вдали от гидрометеорологических станций. В связи с этим особую ценность представляют наблюдения в натурном эксперименте IPY-THORPEX в Норвежском море в марте 2008

года, где были выполнены три полета с зондированием атмосферы, что позволило получить информацию о полном жизненном цикле ПЦ [18].

Было установлено, что 3.03.2008 г. в условиях выноса холодного воздуха с суши на море образовался ПЦ, причем разность температур между поверхностью моря и изобарической поверхностью 500 гПа составляла 45–50 °С. Зондирование атмосферы показало ведущую роль процессов в верхних слоях атмосферы в эволюции ПЦ. Если на стадии циклогенеза циркуляция в ПЦ была сосредоточена ниже 700 гПа, то в зрелой стадии она достигла тропопаузы (примерно на 450 гПа) с максимальными скоростями ветра 26–28 м/с между 700 и 900 гПа, при этом температура в ядре ПЦ была на 3 К выше, чем в окружающих воздушных массах. Также по данным зондирования было получено, что по мере развития ПЦ потоки скрытого тепла увеличивались от 175 до 300 Вт/м<sup>2</sup>, а потоки явного тепла – от 200 до 280 Вт/м<sup>2</sup>, что предполагает постепенное увеличение вклада потоков тепла на поверхности моря в энергетику ПЦ.

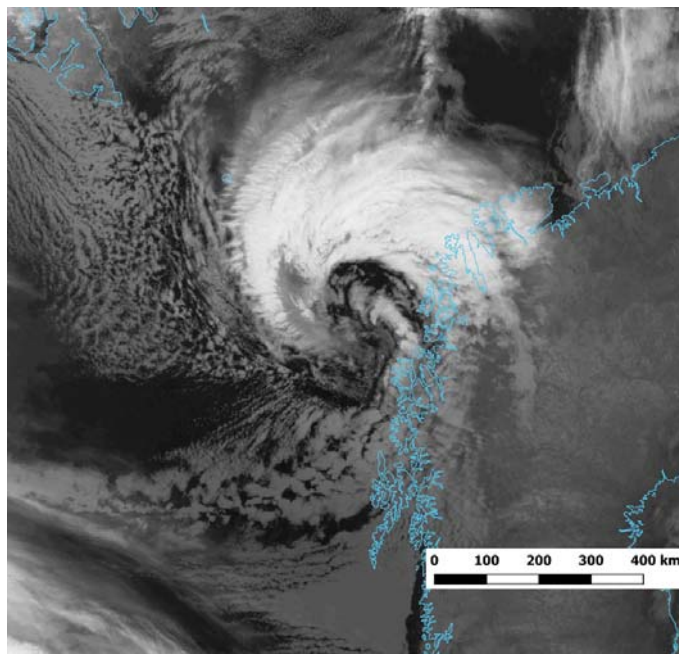
В ноябре 2008 г. было проведено исследование двух ПЦ в Норвежском море на основе приема инфразвукового сигнала на четырех станциях [15]. Известно, что конвективные штормы могут быть источниками инфразвука в широком диапазоне частот, и этот сигнал прослеживается на расстоянии до 1000 км. Эти ПЦ сформировались в тыловой части крупномасштабного циклона на фоне сильного выноса холодного воздуха.

Первый ПЦ сформировался в 19 ч 18.11.2008 г. вблизи от северного побережья Норвегии и просуществовал 25 часов. Структура облачности имела характерный вид спирали с безоблачным «глазом» в центре. Минимальное давление в центре составило 971 гПа, скорость ветра достигала 28 м/с. Второй ПЦ сформировался через несколько часов после диссипации первого циклона и просуществовал 19 часов. Средняя скорость его перемещения составила 12 м/с, минимальное давление в центре 967 гПа, скорость ветра до 38 м/с. Условия распространения инфразвукового сигнала в атмосфере играют важную роль в обнаружении его источника, поэтому мониторинг ПЦ с помощью данной технологии может быть ограничен [15].

Наглядное представление о размерах и структуре ПЦ дает спутниковая информация (рис. 1).

В [9] по данным спутниковых микроволновых радиометров были получены оценки времени жизни, размеров, скорости перемещения и интенсивности полярных циклонов. Для этого применялась методология, основанная на анализе полей восстановленных значений интегрального содержания водяного пара в атмосфере. Выявлено, что частота полярных циклонов в Баренцевом и Норвежском морях практически одинакова. В [5] на основе радиолокационных и оптических съемок исследовались Новоземельская бора и полярные циклоны в Баренцевом море. Показано, что бора охватывает как прибрежную, так и открытую зону Баренцева моря к западу от Новой Земли.

Наиболее полное исследование характеристик ПЦ на основе измерений на восьми станциях в Норвежском и Северном морях выполнено в [38].



**Рис. 1.** Изображение в инфракрасном диапазоне полярного циклона в Норвежском море 24.03.2014 г. [21].

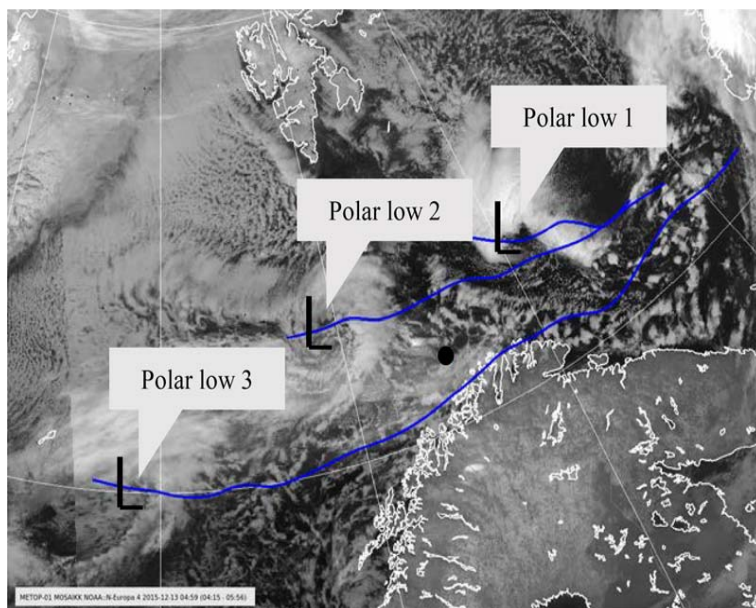
**Fig. 1.** Infrared image of a polar cyclone in the Norwegian sea 24.03.2014 [21].

За зимний период 1999–2013 гг. было зарегистрировано 29 ПЦ. Получено, что в среднем наибольшие скорости ветра и высоты волн возникают через 1–3 ч после прохождения центра ПЦ. Средняя максимальная скорость ветра по 29 ПЦ равна 17,1 м/с (диапазон от 7 до 31 м/с), а средняя максимальная высота значительных волн равна 6,3 м (диапазон от 3,2 до 11 м). Такой большой разброс величин объясняется различиями в размере ПЦ, скорости распространения, особенностями крупномасштабной циркуляции атмосферы. Большие, множественные и быстро перемещающиеся ПЦ при меридиональной циркуляции атмосферы генерируют более высокие скорости ветра и волны, чем малые, единичные и медленные ПЦ при зональной циркуляции. Влияние ПЦ на температуру поверхности моря (ТПМ) мало. Наблюдаемое понижение ТПМ может быть вызвано выносом холодного воздуха (ВХВ), который сопутствует ПЦ.

Область влияния крупного ПЦ может достигать 600 000 км<sup>2</sup> [38]. Обычно максимальные скорости ветра наблюдаются в юго-западном

квадранте ПЦ. Сильные ВХВ благоприятствуют формированию кластеров ПЦ, которые влияют на большую акваторию в течение нескольких суток.

Наиболее полную информацию о множественных ПЦ и их траекториях дают спутниковые изображения облачности, которые в среднем доступны каждые 3 часа (рис. 2).



**Рис. 2.** Спутниковое изображение трех полярных циклонов в Норвежском и Баренцевом морях 13.12.2015 г. Синими линиями показаны траектории ПЦ [33].

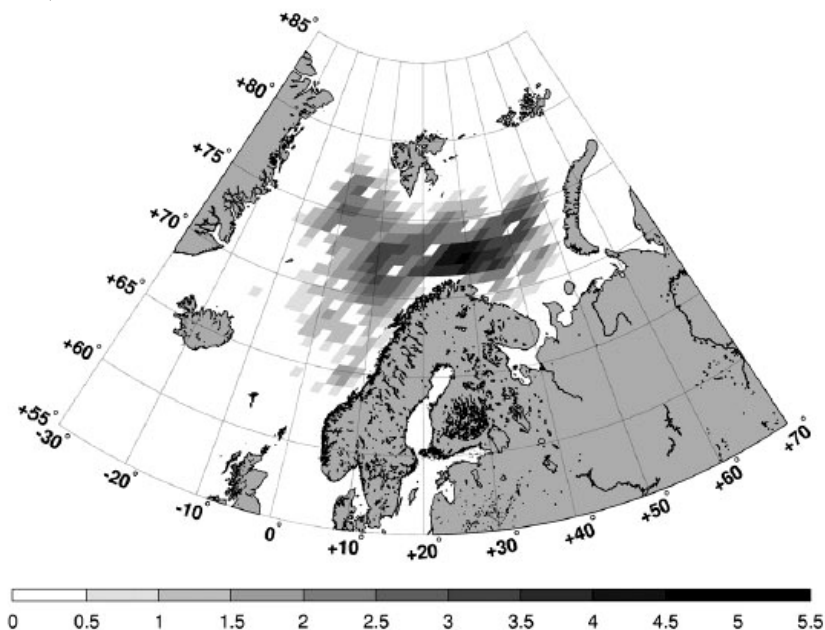
**Fig. 2.** Satellite image of three polar cyclones in the Norwegian and Barents seas on 13.12.2015. The blue lines show the trajectory of the PC [33].

Как видно из рис. 2, циклоны 1 и 2 наблюдались в юго-западной части Баренцева моря, а циклон 3 – в северной части Норвежского моря. Все циклоны двигались на восток. Скорость ветра на побережье Норвегии достигала 25 м/с.

В [41] на основе спутниковой информации в микроволновом диапазоне за период с сентября по апрель 1995–2009 гг. в Норвежском, Баренцевом и Гренландском морях было зафиксировано 637 ПЦ. Наибольшее количество ПЦ сформировалось в Норвежском (42,5 %) и Баренцевом (41 %) морях (рис. 3).

Диапазон межгодовой изменчивости характеризуется максимумом (62 ПЦ) в сентябре – апреле 1999–2000 гг. и минимумом (35 ПЦ) в 2002–2003 гг. Для сезонной изменчивости характерен максимум ПЦ в марте и минимум в сентябре. Интересно отметить, что количество

ПЦ в Баренцевом море с января по апрель коррелирует с площадью льда в январе, при этом с уменьшением площади льда увеличивается количество ПЦ.



**Рис. 3.** Распределение полярных циклонов в Норвежском и Баренцевом морях с сентября 1995 г. по апрель 2009 г. (сглаженное количество ПЦ в ячейке  $75 \times 75$  км) [41].

**Fig.3.** Distribution of polar cyclones in the Norwegian and Barents seas from September 1995 to April 2009 (smoothed number of PC in a  $75 \times 75$  km cell) [41].

Большинство ПЦ не превышают в диаметре 500 км. Среднее время жизни – 9–18 ч, и только 10 % существуют более 24 ч. Траектория большинства ПЦ составляет 100–300 км. Средняя скорость ветра в ПЦ около 19 м/с; наибольшие скорости (33,5 м/с) были отмечены в январе 2000 года.

Подобные характеристики ПЦ, полученные на основе спутниковой информации за 1999–2013 гг., приведены в [37]. Средний диаметр зрелых ПЦ – 350 км, 67 % ПЦ имеют диаметр от 250 до 450 км. Большинство ПЦ существуют менее 24 ч, но некоторые более 48 ч. Траектория ПЦ может достигать 2000 км, но более 80 % ПЦ имеют траектории менее 1000 км.

### Воспроизведение полярных циклонов в реанализах

В последние годы было выполнено несколько исследований характеристик ПЦ на основе реанализов. Наиболее часто использовались

реанализы ERA-Interim с пространственным разрешением  $0,75 \times 0,75^\circ$  [17, 31, 46], MERRA (Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications) с разрешением  $0,5 \times 0,667^\circ$  [36] и ASR (Arctic System Reanalysis) с разрешением  $30 \times 30$  км [13]. В некоторых исследованиях констатируется, что качество отражения ПЦ реанализом ERA-Interim из-за довольно грубого разрешения нельзя признать удовлетворительным. Так, в Норвежском и Баренцевом морях за октябрь – май 1999–2002 гг. из 29 циклонов в реанализе ERA-Interim представлены только 13 циклонов [28].

Наиболее полно полярные циклоны представлены, по-видимому, в новом реанализе ASR для арктического региона с разрешением в первой версии 30 км [13]. Реанализ ASR охватывает значительную часть Арктики к северу от  $40^\circ$  с. ш. и основан на выходной продукции атмосферной модели WRF, адаптированной к полярным районам. Сравнение с данными наблюдений показало, что качество воспроизведения полей ветра в ASR выше, чем в ERA-Interim [13], что важно для отражения полярных циклонов.

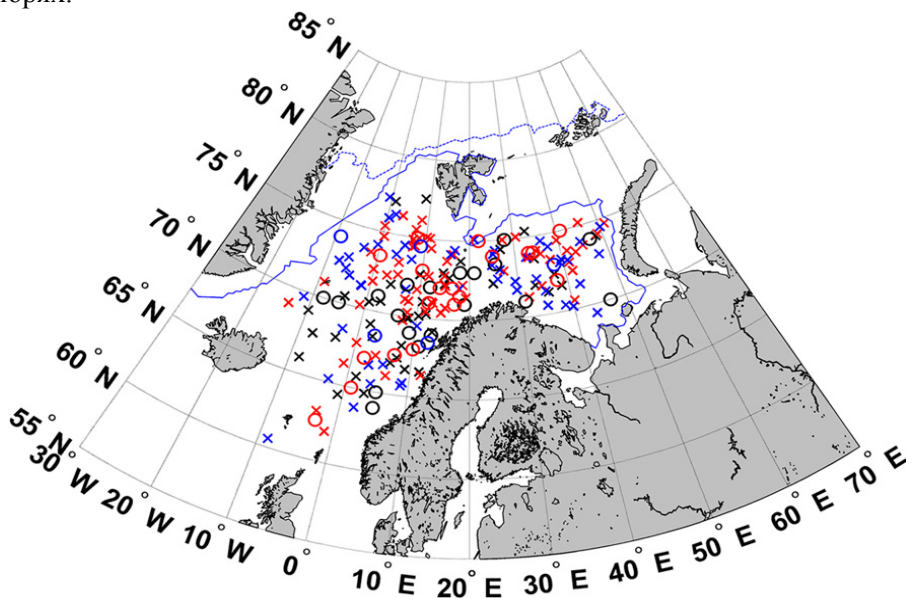
В настоящее время реализована вторая версия реанализа ASR с разрешением 15 км, что улучшило воспроизведение полей ветра. Так, если при воспроизведении сильного ветра в проливе между Гренландией и островом Элсмир 9.02.2007 г. первая версия с разрешением 30 км показала скорость ветра 15 м/с, то вторая версия – 20 м/с, что близко к наблюдаемой [14].

Детальное сравнение качества отражения ПЦ реанализами ASR и ERA-Interim для двух наборов данных выполнено в [42]. Наборы охватывают Гренландское, Норвежское и Баренцево моря и холодный период года (сентябрь – апрель) 2000–2004 гг. Первый набор (46 случаев ПЦ) основан на анализе спутниковой информации в инфракрасном диапазоне с использованием радиометра AVHRR.

Второй набор (158 случаев) использует данные микроволнового датчика SSM/I. В первом наборе реанализом ASR воспроизведено 89 % от общего количества ПЦ, а реанализом ERA-Interim 48 %, во втором наборе – 66 % и 26 % соответственно (рис. 4). Если для реанализа ERA-Interim характерна сильная зависимость между размерами ПЦ и их воспроизведением, то в реанализе ASR качество воспроизведения остается неизменным в диапазоне размеров ПЦ от 200 до 500 км и немного уменьшается для размеров менее 200 км.

Преимущество реанализа ASR по сравнению с ERA-Interim выявлено также в [44], в частности в отражении траектории циклонов. Показано, что наиболее эффективными параметрами для выделения полярных циклонов являются разность между приземным давлением в центре циклона и окружающей средой, разность в потенциальной температуре между поверхностью моря и уровнем 500 гПа и скорость ветра в тропопаузе к се-

веру от циклона. Наиболее часто ПЦ возникают в высоких широтах в области кромки льда и в прибрежных районах, а их наибольшая активность отмечается в Датском проливе, Гренландском, Норвежском и Баренцевом морях.



**Рис. 4.** Распределение ПЦ в апреле–сентябре 2000–2004 гг. Красным цветом обозначены ПЦ, воспроизведенные в ASR, но не воспроизведенные в ERA-Interim, синим – не воспроизведенные в обоих реанализах. Голубые линии – кромка льда [42].

**Fig.4.** Distribution of PC in April-September 2000-2004. Red indicates PC reproduced in ASR but not reproduced in ERA-Interim, blue indicates not reproduced in both reanalysis. Blue lines – the edge of the ice [42].

Косвенной характеристикой качества реанализа ASR является способность идентификации глубоких циклонов с давлением в центре менее 980 гПа. За холодный период года в 2000–2010 гг. в Арктике реанализом ASR был выделен 31 такой циклон, реанализами ERA-Interim и MERRA – 25 и 26 циклонов соответственно [45]. Если брать все циклоны, то преимущество ASR составляет 28 % в холодный период и 40 % – в теплый.

Необходимо отметить появление нового реанализа ERA 5, который заменил ERA-Interim [22, 23]. Реанализ содержит ежечасные поля характеристик атмосферы, суши и океана с разрешением 31 км с 1950 г. по настоящее время. Атмосфера представлена 139 уровнями от поверхности Земли до изобарической поверхности 0,01 гПа (примерно 80 км). Основное преимущество ERA 5 по сравнению с ERA-Interim состоит в том, что он позволяет значительно улучшить описание синоптических и мезомасштабных процессов, в том числе и полярных циклонов.



В [34] выполнена оценка качества воспроизведения приземного ветра в пяти реанализах: ERA 5, ERA-Interim, JRA 55 (Япония), MERRA 2 и R1(NCEP/NCAR). Данные реанализов сравнивались с наблюдениями ветра на 77 метеорологических мачтах по всему миру за 1980–2017 гг. По оценкам средней скорости ветра и ее изменчивости наилучшие результаты показал реанализ ERA 5. В данном исследовании, выполненном в интересах ветровой энергетики, подчеркивается, что реанализ ERA 5, функционируя в оперативном режиме, позволяет получать в реальном времени информацию, необходимую для принятия решений.

Использование реанализа ERA 5 позволило описать высокую пространственно-временную изменчивость потоков тепла на поверхности в море Ирмингера в зимний период, что важно для характеристики циркуляции океана в высоких широтах Северной Атлантики [24].

Несмотря на совершенствование реанализов, их возможности воспроизведения полярных циклонов, отличающихся небольшими размерами и коротким временем жизни, остаются ограниченными. В связи с этим иногда используется процедура даунскейлинга, когда с помощью региональной атмосферной модели выполняется детализация реанализа для рассматриваемой области с более высоким пространственным разрешением. При этом применяется технология «спектрального притягивания» (spectral nudging), которая направлена на то, чтобы региональная модель «учитывала» особенности крупномасштабной циркуляции атмосферы. В [2] такая технология реализуется с помощью модели COSMO-CLM [12]. Также используются данные реанализов NCEP/NCAR, ERA-Interim, MERRA и ASR.

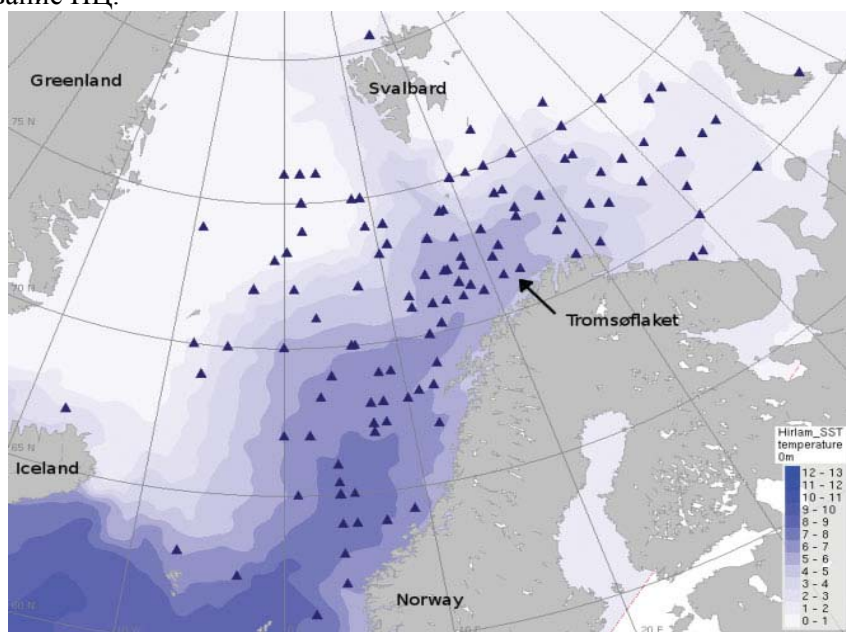
На основе описанной технологии в [2] были рассчитаны характеристики (скорость ветра и приземное давление) нескольких полярных циклонов в Норвежском, Баренцевом, Карском морях и в море Лаптевых. Для оценки моделирования привлекалась спутниковая информация о ветре и облачности. Наилучшие результаты, в частности по воспроизведению максимальной скорости ветра в циклоне, были получены для реанализа ASR.

### **Механизмы формирования полярных циклонов и их моделирование**

В большинстве исследований указывается, что благоприятными условиями для формирования ПЦ является адвекция (выносы) холодного воздуха из полярных широт на относительно теплую поверхность моря. Возникающие при этом большие потоки тепла и влаги способствуют формированию мезомасштабных вихрей в атмосфере [29, 37]. Чаще всего ПЦ образуются в районах теплых течений (рис. 5).

В свою очередь, возникновению выносов холодного воздуха сопутствуют отрицательная аномалия высоты изобарической поверхности

500 гПа, положительная аномалия разности между температурой воды на поверхности моря и температурой воздуха на поверхности 500 гПа и положительная аномалия потенциальной завихренности на 300 гПа [21]. Последний параметр характеризует воздействие стратосферы на формирование ПЦ.



**Рис. 5.** Положение ПЦ в 2000–2009 гг. Заливка синим цветом – среднемноголетняя температура поверхности моря в январе [24].

**Fig.5.** The position of the PC in 2000-2009. Fill in blue – the average annual temperature of the sea surface in January [24].

Более детально выносы холодного воздуха исследовались в [25, 26], где показано, что образование выносов связано с сильной бароклинностью в нижних слоях атмосферы. Большие скорости ветра при выносе могут продолжаться несколько дней.

В некоторых работах обнаружена связь между погодными режимами атмосферной циркуляции (с временем жизни 8–10 суток) в Атлантико-Европейском регионе и формированием ПЦ. В Норвежском и Баренцевом морях 37 % ПЦ формировались при наличии области высокого давления над Северной Атлантикой, а 28 % при отрицательной фазе североатлантического колебания (САК) [21]. Погодные режимы влияют также на направление движения ПЦ. При режиме «скандинавский блокинг» большинство ПЦ движутся на восток, а при отрицательной фазе САК – на юго-запад. Благоприятным для формирования ПЦ является близость ледяных полей. Так, за период с 1999 по 2013 г. около 25 % ПЦ образовались в районах, близких к кромке льда [27]. В связи с уменьшением ледя-

ного покрова в последние зимы возникли новые области формирования ПЦ, особенно к западу от Шпицбергена и в Баренцевом море.

В работах по моделированию в большинстве случаев изучались условия, благоприятные для формирования и эволюции конкретного ПЦ, в частности, возникшего в Норвежском море в начале марта 2008 г. в период проведения натурального эксперимента IPY-THORPEX. В [8] на основе модели WRF с шагом сетки 9 км моделировались условия, благоприятные для формирования ПЦ. В одном из численных экспериментов температура поверхности моря была повышена на 5 К. Это привело к сильному выносу арктического воздуха над Норвежским морем и образованию хорошо выраженной бароклинной зоны, которая отсутствовала в контрольном эксперименте. В этой зоне сформировался вторичный мезомасштабный циклон, который перерос в интенсивный ПЦ с ураганскими ветрами. Делается вывод, что формирование ПЦ было обусловлено бароклинной неустойчивостью.

В [27] исследовалась возможность оперативного прогноза этого же ПЦ с помощью ансамблевой прогностической системы, включающей 21 член. Основу системы составляла модель Met Office с разрешением 4 км. Было показано, что область низкого давления вызвала вынос холодного воздуха, который привел к формированию ПЦ. Предварительный вывод состоит в том, что на основе ансамблевой системы можно прогнозировать формирование ПЦ с заблаговременностью до двух суток.

Интересны случаи, когда полярные циклоны по структуре поля облачности напоминали тропические циклоны. Подобный циклон исследовался в [19] на основе модели WRF с разрешением 3 км. Циклон сформировался в Баренцевом море 18.12.2002 г. и был необычно глубоким (961 гПа в центре). Этот ПЦ был подобен тропическому циклону, так как имел в центре «глаз», окруженный облачностью в виде спирали. Близость ПЦ к кромке льда и большие скорости ветра (до 25 м/с) в стадии заглупления способствовали формированию больших потоков явного и скрытого тепла около 1200 и 400 Вт/м<sup>2</sup> соответственно. Численные эксперименты показали, что заглуплению ПЦ способствовали рост бароклинности и влияние потенциальной завихренности в верхних слоях атмосферы. После стадии заглупления бароклинность уменьшилась и циклон подпитывали потоки явного тепла, а потоки скрытого тепла играли второстепенную роль.

Подобные выводы были получены в [16] при моделировании ПЦ в Норвежском море в октябре 1993 г. Отличительными чертами этого ПЦ было то, что он сформировался в октябре (раньше обычного) и просуществовал около трех суток. Численное моделирование проводилось на основе гидростатической модели на примитивных уравнениях с сигма-уровнями по вертикали. В результате моделирования было получено, что формированию ПЦ способствовало наличие аномалии потенциальной завихренности на верхних уровнях атмосферы и арктического фронта в

приземном слое к югу от кромки льда. В дальнейшем интенсификации ПЦ способствовали сильные потоки скрытого и явного тепла на поверхности моря. Сделан вывод, что успешность моделирования в значительной степени зависит от количества уровней в нижнем 2-километровом слое атмосферы.

В марте 2013 г. в Норвежском море на границе продолжительного выноса холодного воздуха, способствовавшего формированию полярных циклонов, возникла зона с большими градиентами характеристик (зона сдвига). В частности, максимальный градиент скорости ветра в нижних слоях атмосферы составлял 25 м/с на 50 км. Для исследования этой зоны использовались наблюдения с самолета, данные зондов, радара, а также данные спутниковых скаттерометров. По наблюдениям, скорость ветра достигала 27 м/с [29].

Численное моделирование проводилось с помощью модели Met Office, описывающей, в том числе, конвективные процессы. Модель успешно воспроизвела зону сдвига и структуру поля облачности, однако были значительно занижены величина влагосодержания и высота облачности.

В [40] исследовалось влияние орографии Шпицбергена и морского льда в Норвежском и Баренцевом морях на развитие ПЦ. Использовалась модель Met Office с шагом сетки, разрешающим конвективные процессы. Было показано, что Шпицберген блокирует потоки устойчиво стратифицированного воздуха из покрытого льдом Северного ледовитого океана и, как дополнительный источник циклонической завихренности в нижней атмосфере, помогает формированию и развитию ПЦ. Уменьшение площади льда к западу от Шпицбергена результируется в умеренной интенсификации ПЦ, в то время как увеличение площади льда значительно препятствует развитию ПЦ.

В [8] были выполнены численные эксперименты с моделью COSMO-Ru по изучению развития полярного циклона 25–27.03.2014 г. в Баренцевом и Карском морях. Показано, что развитие циклона существенно зависит от состояния подстилающей поверхности. В частности, при уменьшении сплоченности льда циклон усиливается и может изменить траекторию, смещаясь в направлении открытой поверхности моря.

Уникальный случай полярного циклона в Северном море был зафиксирован 1.01.1995 г. [11]. Этот циклон вызвал волну высотой 25,6 м в районе нефтяной платформы Draupner. Циклон был обнаружен в 00 ч 1.01.1995 г. у побережья Норвегии, далее быстро смещался на юг, и, когда достиг платформы Draupner, скорость ветра в нем превышала 20 м/с. Перемещение циклона было спрогнозировано на основе атмосферной модели Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды с разрешением 9 км.

В связи с глобальным потеплением актуальным является вопрос о характеристиках полярных циклонов в будущем климате. В [30] были

смоделированы условия формирования полярных циклонов в конце XXI века на основе модели взаимодействия океан-атмосфера ECHAM5/MPI-OM. Подход основан на концепции погодных режимов в Северной Атлантике, где ранее были выделены четыре основных режима: положительная и отрицательная фазы североатлантического колебания, скандинавский блокинг и атлантический гребень. Изучалось развитие полярных циклонов в зависимости от эволюции погодных режимов в будущем климате на основе сценария A2. Основным параметром, от которого зависит формирование погодных режимов и ПЦ, считается разность между температурой поверхности океана и температурой воздуха на изобарической поверхности 500 гПа. Результаты показывают, что в будущем климате благоприятные для развития ПЦ условия будут возникать реже, чем в современном климате.

### Заключение

Исследования, выполненные в последние годы, позволили получить новые знания о природе формирования и эволюции полярных циклонов. Одним из основных условий формирования ПЦ является вынос холодного арктического воздуха на относительно теплую поверхность моря, который, в свою очередь, может быть связан с аномалией потенциальной завихренности в верхних слоях атмосферы. Дальнейшей интенсификации циклона способствуют потоки скрытого и явного тела на поверхности моря. Наиболее часто ПЦ возникают в области кромки льда и в прибрежных районах. В реанализе ASR для арктического региона полярные циклоны воспроизводятся более успешно, чем в реанализах ERA-Interim, MERRA и др. Перспективным является использование реанализа ERA 5, который заменил ERA-Interim.

На формирование и эволюцию полярных циклонов могут влиять погодные режимы атмосферной циркуляции в Атлантико-Европейском регионе. Основанное на этой связи моделирование показало, что в будущем климате благоприятные для развития ПЦ условия будут возникать реже, чем в современном климате.

### Список литературы

1. Бухаров М.В., Геохлаян Т.Х. Статистический анализ приводного ветра по спутниковым радиолокационным измерениям при мезоциклоне над Баренцевым морем 19 апреля 1996 г. // Метеорология и гидрология. 2000. № 5. С. 101-108.
2. Варенцов М.И., Вереземская П.С., Заболотских Е.В., Репина И.А. Оценка качества воспроизведения полярных мезоциклонов по данным реанализов и результатам регионального климатического моделирования // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13, № 4. С. 168-191.
3. Голицын Г.С. Ураганы, полярные и тропические, их энергия и размеры, количественный критерий возникновения // Известия РАН. ФАО. 2008. Т.44, № 5. С. 579-590.

4. Заболотских Е.В., Гурвич И.А., Шапрон Б. Новые районы распространения полярных циклонов в Арктике как результат сокращения площади ледяного покрова // Исследование Земли из космоса. 2015. № 2. С. 64-77.

5. Иванов А.Ю. Новоземельская бора и полярные циклоны по данным космических радиолокационных и оптических съемок// Исследование Земли из космоса. 2016. № 4. С. 9-22.

6. Луценко Э.И., Лагун В.Е. Полярные мезомасштабные циклоны в атмосфере над Баренцевым и Карским морями // Проблемы Арктики и Антарктики. 2013. № 2 (96). С. 76-89.

7. Нестеров Е.С. Экстремальные циклоны в атлантико-европейском регионе. М.: Гидрометцентр России, 2018. 104 с.

8. Никитин М.А., Ривин Г.С., Розинкина И.А., Чумаков М.М. Использование прогностической системы COSMO-Ru для исследования свойств полярных циклонов: эпизод 25–27 марта 2014 года // Труды Гидрометцентра России. 2016. Вып. 361. С. 128-145.

9. Смирнова Ю.Е., Заболотских Е.В., Бобылев Л.П., Шапрон Б. Статистические характеристики полярных циклонов в морях северо-европейского бассейна по данным спутниковых микроволновых радиометров // Исследование Земли из космоса. 2016. № 3. С. 27-36.

10. Adakudlu M., Barstad I. Impacts of the ice-cover and sea-surface temperature on a polar low over the Nordic seas: a numerical case-study// Q. J. R. Met. Soc. 2011. Vol. 137. P. 1716-1730.

11. Bidlo J.-R. et al. What conditions led to the Draupner freak wave? // ECMWF Newsletter. 2016. No. 148. P. 37-40.

12. Böhm U., Kücken M., Ahrens W., Block A. et al. CLM – the climate version of LM: Brief description and long-term applications // COSMO Newsletter. 2006. Vol. 6. P. 225-235.

13. Bromwich D.H., Wilson A.B., Bai L., Liu Z. et al. A comparison of the regional Arctic System Reanalysis and the global ERA-Interim Reanalysis for the Arctic// Q. J. R. Met. Soc. 2016. Vol. 142, no. 695. P. 644-658.

14. Bromwich D.H., Wilson A.B., Bai L., Liu Z. et al. The Arctic system reanalysis, version 2 // BAMS. 2018. Vol.99, no. 4. P. 805-828.

15. Claud C., Dalaudier F., Kero J., Le Pichon A. et al. Exploring the signature of polar lows in infrasound: the 19-20 November 2008 case // Tellus A. 2017. Vol. 69. P. 1-9.

16. Claud C., Heinemann G., Raustein E., McMurdie L. Polar low le Cygne: satellite observations and numerical simulations // Q. J. R. Met. Soc. 2004. Vol. 130. P. 1075-1102.

17. 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 // Q. J. R. Met. Soc. 2011. Vol. 137, no. 656. P. 553-597.

18. Førø, I., Kristjansson J., Sætra O., Breivik O., Røsting B., Shapiro M. The full life cycle of a polar low over the Norwegian Sea observed by three research aircraft flights // Q. J. R. Met. Soc. 2011. Vol. 137. P. 1659-1673.

19. Førø I, Kristjansson J.E., Kolstad E.W., Bracegirdle T.J. et al. A ‘hurricane-like’ polar low fuelled by sensible heat flux: high-resolution numerical simulations // Q. J. R. Met. Soc. 2012. Vol. 138. P. 1308-1324.

20. Heinemann G., Claud C. Report of a workshop on “Theoretical and observational studies of polar lows” of the European Geophysical Society Polar Lows Working Group // BAMS. 1997. Vol. 78. P. 2643-2658.

21. Heinemann G., Claud C., Spengler T. Polar low workshop // BAMS. 2019. Vol. 101, no. 2. ES89-ES92.

22. Hersbach H., Dee D. ERA5 reanalysis is in production // ECMWF Newsletter. 2016. Vol. 147. P. 7.

23. Hoffmann L., Günther G., Li D., Stein O. et al. From ERA-Interim to ERA5: the considerable impact of ECMWF’s next-generation reanalysis on Lagrangian transport simulations // Atm. Chem. Phys. 2019. Vol. 19. P. 3097-3124.

24. Josey S.A., de Jong M.F., Oltmanns M., Moore G.K. et al. Extreme variability in Irminger Sea winter heat loss revealed by ocean observatories initiative mooring and the ERA5 reanalysis // *Geophys. Res. Lett.* 2019. Vol. 46. P. 293-302.
25. Kolstad E.W. Extreme small-scale wind episodes over the Barents Sea: when, where and why? // *Clim. Dyn.* 2015. Vol. 45, no. 7-8. P. 2137-2150.
26. Kolstad E.W. Higher ocean wind speeds during marine cold air outbreaks // *Q. J. Roy. Met. Soc.* 2017. Vol. 143, no. 706. P. 2084-2092.
27. Kristiansen J., Sørland S., Iversen T., Bjørge D., Koltzow M. High resolution ensemble prediction of a polar low development // *Tellus A.* 2011. Vol. 63. P. 585-604.
28. 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 // *Mon. Weath. Rev.* 2014. Vol. 142. P. 2271-2289.
29. Mallet P.-T., Claud C., Cassou C., Noer G., Kodera K. Polar lows over the Nordic and Labrador seas: synoptic circulation patterns and associations with North Atlantic-Europe wintertime weather regimes // *J. Geophys. Res. Atmos.* 2013. Vol. 118. P. 2455-2472.
30. Mallet P.-E., Claud C., Vicomte M. North Atlantic polar lows and weather regimes: do current links persist in a warmer climate? // *Atmos. Sci. Lett.* 2017. Vol. 18. P. 349-355.
31. Michel C., Terpstra A., Spengler T. Polar mesoscale cyclone climatology for the Nordic seas based on ERA-Interim // *J. Climate.* 2018. Vol. 31, no. 6. P. 2511-2532.
32. Noer G., Saetra O., Lien T., Gusdal Y. A climatological study of polar lows in the Nordic Seas // *Q. J. Roy. Met. Soc.* 2011. Vol. 137. P. 1762-1772.
33. Orimolade A.P., Furevik B.R., Noer G., Gudmestad O.T., Samelson R.M. Waves in polar lows // *J. Geophys. Res. Oceans.* 2016. Vol. 121. P. 6470-6481.
34. Ramon J., Lledó L., Torralba V., Soret A. et al. What global reanalysis best represents near-surface winds? // *Q. J. R. Met. Soc.* 2019. Vol. 145, is. 724. P. 3236-3251. DOI: 10.1002/qj.3616
35. Rasmussen E.A., Turner J. Polar lows: mesoscale weather systems in the polar regions. Cambridge: Cambridge University Press, 2003.
36. Rienecker M.M., Suarez M.J., Gelaro R., Todling R. et al. MERRA: NASA's Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications // *J. Clim.* 2011. Vol. 24. P. 3624-3648.
37. Rojo M., Claud C., Mallet P.-E., Noer G., Carleton A.M., Vicomte M. Polar low tracks over the Nordic Seas: A 14-winter climatic analysis // *Tellus.* 2015. Vol. 67A. P. 1-20.
38. Rojo M., Claud C., Noer G., Carleton A.M. In situ measurements of surface winds, waves, and sea state in polar lows over the North Atlantic // *J. Geophys. Res.: Atmospheres.* 2019. Vol. 124. P. 700-718.
39. Sergeev D.E., Renfrew I.A., Spengler T., Dorlinga S.R. Structure of a shear-line polar low // *Q. J. R. Met. Soc.* 2017. Vol. 143. P. 12-26.
40. Sergeev D., Renfrew I.A., Spengler T. Modification of polar low development by orography and sea ice // *Mon. Wea. Rev.* 2018. Vol. 146, no.11. P. 3325-3341.
41. Smirnova J.E. et al. Polar low climatology over the Nordic and Barents seas based on satellite passive microwave data // *Geophys. Res. Lett.* 2015. Vol. 42, no. 13. P. 5603-5609.
42. Smirnova J., Golubkin P. Comparing polar lows in atmospheric reanalyses: Arctic System Reanalysis versus ERA-Interim // *Mon. Wea. Rev.* 2017. Vol. 145, no. 6. P. 2375-2383.
43. Spengler T., Claud C., Henemann G. Summary for the 13th Polar Low Workshop Summary // *Workshop. Bull. Am. Meteorol. Soc.* 2017. Vol. 98, no. 6. ES139-ES142. DOI: dx.doi.org/10.1175/BAMS-D-16-0207.1.
44. Stoll P.J., Graverson R.G., Noer G. et al. An objective global climatology of polar lows based on reanalysis data // *Q. J. Roy. Met. Soc.* 2018. Vol. 144, no. 716. P. 2099-2117.
45. Tilinina N., Gulev S.K., Bromwich D.H. New view of Arctic cyclone activity from the Arctic system reanalysis // *Geophys. Res. Lett.* 2014. Vol. 41. P. 1766-1772.
46. Zappa G., Shaffrey L., Hodges K. Can polar lows be objectively identified and tracked in the ECMWF operational analysis and the ERA-Interim reanalysis? // *Mon. Wea. Rev.* 2014. Vol. 142. P. 2596-2608.

## References

1. Bukharov M. V., Geokhlyan T. Kh. Satellite Radar Observations of Wind Field Characteristics in the Barents Sea During a Mesocyclone on 19 April 1996. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2000, no. 5, pp. 70-75.
2. Varentsov M.I., Verezemskaya P.S., Zabolotskikh E.V., Repina I.A. Evaluation of the quality of polar low reconstruction using reanalysis and regional climate modelling. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa [Current problems in remote sensing of the Earth from Space]*, 2016, vol. 13, no. 4, pp. 168-191. DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-8-168-191 [in Russ.].
3. Golitsyn G.S. Polar lows and tropical hurricanes: Their energy and sizes and a quantitative criterion for their generation. *Izv., Atmos. Oceanic Phys.*, 2008, vol. 44, no. 5, pp. 537-547. DOI: 10.1134/S0001433808050010.
4. Zabolotskikh E. V., Gurvich I. A., Chapron B. New Areas of Polar Lows Over the Arctic as a Result of Sea Ice Extent Decrease. *Issledovanie Zemli iz kosmosa [Earth research from space]*, 2015, no. 2, pp. 64-77. DOI: 10.7868/S0205961415020116 [in Russ.].
5. Ivanov A.Yu. Novaya Zemlya Bora and Polar Cyclones Visible from Space in Radar and Optical Imagery. *Issledovanie Zemli iz kosmosa [Earth research from space]*, 2016, no. 4, pp. 9-22 [in Russ.].
6. Lutsenko E.I., Lagun V.E. Polar meso-scale cyclones in the atmosphere over Barents and Kara seas. *Problemy Arktiki i Antarktiki [Arctic and Antarctic Research]*, 2013, vol. 96, no. 2, pp. 76-89 [in Russ.].
7. Nesterov E.S. Ekstremal'nye ciklony v atlantiko-evropeyskom regione. Moscow, Hydrometcenter of Russia, 2018, 104 p. [in Russ.].
8. Nikitin M.A., Rivin G.S., Rozinkina I.A., Chumakov M.M. Use of COSMO-Ru forecasting system for polar low's research: case study 25-27 March 2014. *Trudy Gidromettsentra Rossii [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia]*, 2016, vol. 361, pp. 128-145 [in Russ.].
9. Smirnova J. E., Zabolotskikh E.V., Bobylev L.P., Chapron B. Statistical Characteristics of Polar Lows in the Nordic Seas Using Satellite Passive Microwave Data. *Issledovanie Zemli iz kosmosa [Earth research from space]*, 2016, no. 3, pp. 27-36. DOI: 10.7868/S0205961415040119 [in Russ.].
10. Adakudlu M., Barstad I. Impacts of the ice-cover and sea-surface temperature on a polar low over the Nordic seas: a numerical case-study. *Q. J. R. Met. Soc.*, 2011, vol. 137, pp. 1716-1730.
11. Bidlo J.-R. et al. What conditions led to the Draupner freak wave? *ECMWF Newsletter*, 2016, No. 148, pp. 37-40.
12. Böhm U., Kücken M., Ahrens W., Block A. et al. CLM – the climate version of LM: Brief description and long-term applications. *COSMO Newsletter*, 2006, vol. 6, pp. 225-235.
13. Bromwich D.H., Wilson A.B., Bai L., Liu Z. et al. A comparison of the regional Arctic System Reanalysis and the global ERA-Interim Reanalysis for the Arctic. *Q. J. R. Met. Soc.*, 2016, vol. 142, no. 695, pp. 644-658.
14. Bromwich D.H., Wilson A.B., Bai L., Liu Z., Barlage M., Shih C., Maldonado S., Hines K.M., Wang S., Woollen J., Kuo B., Lin H., Wee T., Serreze M.C., Walsh J.E. The Arctic System Reanalysis, Version 2. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 2011, vol. 99, pp. 805–828, DOI: 10.1175/BAMS-D-16-0215.1.
15. Claud C., Dalaudier F., Kero J., Le Pichon A. et al. Exploring the signature of polar lows in infrasound: the 19-20 November 2008 case s. *Tellus A.*, 2017, vol. 69, pp. 1-9.
16. Claud C., Heinemann G, Raustein E, McMurdie L. Polar low le Cygne: satellite observations and numerical simulations. *Q. J. R. Met. Soc.*, 2004, vol. 130, pp. 1075-1102.
17. 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. *Q. J. R. Met. Soc.*, 2011, vol. 137, no. 656, pp. 553-597.



18. Førø, I., Kristjansson J., Saetra O., Breivik O., Røsting B., Shapiro M. The full life cycle of a polar low over the Norwegian Sea observed by three research aircraft flights. *Q. J. R. Met. Soc.*, 2011, vol. 137, pp. 1659-1673.
19. Førø I, Kristjansson J.E., Kolstad E.W., Bracegirdle T.J. et al. A 'hurricane-like' polar low fuelled by sensible heat flux: high-resolution numerical simulations. *Q. J. R. Met. Soc.*, 2012, vol. 138, pp. 1308-1324.
20. Heinemann G., Claud C. Report of a workshop on "Theoretical and observational studies of polar lows" of the European Geophysical Society Polar Lows Working Group. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1997, vol. 78, pp. 2643-2658.
21. Heinemann G., Claud C., Spengler T. Polar low workshop. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 2019, vol. 101, no. 2, pp. ES89-ES92. DOI: 10.1175/BAMS-D-18-0103.1.
22. Hersbach H., Dee D. ERA5 reanalysis is in production. *ECMWF Newsletter*, 2016, vol. 147, pp. 7.
23. Hoffmann L., Günther G., Li D., Stein O. et al. From ERA-Interim to ERA5: the considerable impact of ECMWF's next-generation reanalysis on Lagrangian transport simulations. *Atm. Chem. Phys.*, 2019, vol. 19, pp. 3097-3124.
24. Josey S.A., de Jong M.F., Oltmanns M., Moore G.K. et al. Extreme variability in Irminger Sea winter heat loss revealed by ocean observatories initiative mooring and the ERA5 reanalysis. *Geophys. Res. Lett.*, 2019, vol. 46, pp. 293-302.
25. Kolstad E.W. Extreme small-scale wind episodes over the Barents Sea: when, where and why? *Clim. Dyn.*, 2015, vol. 45, no. 7-8, pp. 2137-2150.
26. Kolstad E.W. Higher ocean wind speeds during marine cold air outbreaks. *Q. J. Roy. Met. Soc.*, 2017, vol. 143, no. 706, pp. 2084-2092.
27. Kristiansen J., Sørland S., Iversen T., Bjørge D., Koltzow M. High resolution ensemble prediction of a polar low development. *Tellus A.*, 2011, vol. 63, pp. 585-604.
28. Laffineur T., Claud C., Chaboureau 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. *Mon. Weath. Rev.*, 2014, vol. 142, pp. 2271-2289.
29. Mallet P.-T., Claud C., Cassou C., Noer G., Kodera K. Polar lows over the Nordic and Labrador seas: synoptic circulation patterns and associations with North Atlantic-Europe wintertime weather regimes. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 2013, vol. 118, pp. 2455-2472.
30. Mallet P.-E., Claud C., Vicomte M. North Atlantic polar lows and weather regimes: do current links persist in a warmer climate? *Atmos. Sci. Let.*, 2017, vol. 18, pp. 349-355.
31. Michel C., Terpstra A., Spengler T. Polar mesoscale cyclone climatology for the Nordic seas based on ERA-Interim. *J. Climate.*, 2018, vol. 31, no. 6, pp. 2511-2532.
32. Noer G., Saetra O., Lien T., Gusdal Y. A climatological study of polar lows in the Nordic Seas. *Q. J. Roy. Met. Soc.*, 2011, vol. 137, pp. 1762-1772.
33. Orimolade A.P., Furevik B.R., Noer G., Gudmestad O.T., Samelson R.M. Waves in polar lows. *J. Geophys. Res. Oceans.*, 2016, vol. 121, pp. 6470-6481.
34. Ramon J., Lledó L., Torralba V., Soret A. et al. What global reanalysis best represents near-surface winds? *Q. J. R. Met. Soc.*, 2019, vol. 145, no. 724, pp. 3236-3251. DOI: 10.1002/qj.3616.
35. Rasmussen E.A., Turner J. Polar lows: mesoscale weather systems in the polar regions. Cambridge, Cambridge University Press, 2003.
36. Rienecker M.M., Suarez M.J., Gelaro R., Todling R. et al. MERRA: NASA's Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications. *J. Clim.*, 2011, vol. 24, pp. 3624-3648.
37. Rojo M., Claud C., Mallet P.-E., Noer G., Carleton A.M., Vicomte M. Polar low tracks over the Nordic Seas: A 14-winter climatic analysis. *Tellus*, 2015, vol. 67A, pp. 1-20.
38. Rojo M., Claud C., Noer G., Carleton A.M. In situ measurements of surface winds, waves, and sea state in polar lows over the North Atlantic. *J. Geophys. Res.: Atmospheres*, 2019, vol. 124, pp. 700-718.

39. Sergeev D.E., Renfrew I.A., Spengler T., Dorlinga S.R. Structure of a shear-line polar low. *Q. J. R. Met. Soc.*, 2017, vol. 143, pp. 12-26.
40. Sergeev D., Renfrew I.A., Spengler T. Modification of polar low development by orography and sea ice. *Mon. Wea. Rev.*, 2018, vol. 146, no.11, pp. 3325-3341.
41. Smirnova J. E., Golubkin P. A., Bobilev L. P., Zabolotskikh E. V., Chapron B. Polar low climatology over the Nordic and Barents seas based on satellite passive microwave data. *Geophys. Res. Lett.*, 2015, vol. 42, no. 13, pp. 5603-5609. DOI: 10.1002/2015GL063865
42. Smirnova J., Golubkin P. Comparing polar lows in atmospheric reanalyses: Arctic System Reanalysis versus ERA-Interim. *Mon. Wea. Rev.*, 2017, vol. 145, no. 6, pp. 2375-2383.
43. Spengler T., Claud C., Henemann G. Summary for the 13th Polar Low Workshop Summary. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 2017, vol. 98, no. 6, pp. ES139-ES142. DOI: dx.doi.org/10.1175/BAMS-D-16-0207.1
44. Stoll P.J., Graverson R.G., Noer G. et al. An objective global climatology of polar lows based on reanalysis data. *Q. J. Roy. Met. Soc.*, 2018, vol. 144, no. 716, pp. 2099-2117.
45. Tilinina N., Gulev S.K., Bromwich D.H. New view of Arctic cyclone activity from the Arctic system reanalysis. *Geophys. Res. Lett.*, 2014, vol. 41, pp. 1766-1772.
46. Zappa G., Shaffrey L., Hodges K. Can polar lows be objectively identified and tracked in the ECMWF operational analysis and the ERA-Interim reanalysis? *Mon. Wea. Rev.*, 2014, vol. 142, pp. 2596-2608.

Поступила в редакцию 10.02.2020 г.

Received by the editor 10.02.2020.