

Баланс энергии в полярном мезоциклоне над Баренцевым морем

Д. А. Яровая , В. В. Ефимов

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия
 darik777@mhi-ras.ru

Поступила в редакцию 03.07.2022; одобрена после рецензирования 14.09.2022;
принята к публикации 08.11.2022.

Аннотация

Цель. Цель работы – исследовать влияние морского ледового покрова на интенсивность полярного мезомасштабного циклона, существовавшего 15–16 марта 2021 г. над Баренцевым морем.

Методы и результаты. Для численного исследования циклона использовалась полярная версия мезомасштабной модели WRF. Проведен численный эксперимент, в котором морской лед в расчетной области заменили водой с температурой 271,46 К. Чтобы выявить основные факторы усиления полярного мезомасштабного циклона, использовали уравнение баланса средней по пространству кинетической энергии циклона. Рассмотрены основные составляющие уравнения баланса кинетической энергии: работа силы, обусловленной радиальным градиентом давления, F_{pres} , влияние адвекции и работа инерционных сил Adv , а также работа силы турбулентного трения F_{fric} . Получено, что удаление морского льда из расчетной области привело к уменьшению интенсивности полярного мезомасштабного циклона. Проведено количественное сравнение величин F_{pres} , Adv и F_{fric} в основном расчете и в эксперименте и показано, что уменьшение интенсивности произошло в основном в результате уменьшения F_{pres} и Adv .

Выводы. Уменьшение F_{pres} является следствием того, что в основном расчете северная часть полярного мезомасштабного циклона располагалась над морским льдом и температура приповерхностного воздуха в этой части была на 25–30 °С ниже, чем в южной. Удаление морского льда привело к увеличению приповерхностной температуры воздуха на периферии циклона и уменьшению приповерхностного перепада давления между центром и периферией вихря. Уменьшение Adv связано с деформацией циклона в эксперименте, вследствие чего произошло увеличение пульсационной составляющей азимутальной и радиальной скорости. Оба этих фактора и привели к понижению интенсивности полярного мезомасштабного циклона в эксперименте.

Ключевые слова: полярный мезомасштабный циклон, мезомасштабное атмосферное моделирование, численный эксперимент, морской лед, модель WRF, баланс энергии

Благодарности: работа выполнена в рамках проекта FNNN-2021-0002 «Фундаментальные исследования процессов взаимодействия в системе океан-атмосфера, определяющих региональную пространственно-временную изменчивость природной среды и климата» (шифр «Взаимодействие океана и атмосферы»).

Для цитирования: Яровая Д. А., Ефимов В. В. Баланс энергии в полярном мезоциклоне над Баренцевым морем // Морской гидрофизический журнал. 2023. Т. 39, № 1. С. 5–20. EDN PCDVNM. doi:10.29039/0233-7584-2023-1-5-20

Energy Balance in the Polar Mesoscale Cyclone over the Barents Sea

D. A. Iarovaia , V. V. Efimov

Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia
 darik777@mhi-ras.ru

Abstract

Purpose. The purpose of the paper is to study the effect of sea ice cover on the intensity of the polar mesoscale cyclone that took place on March 15–16, 2021 over the Barents Sea.

Methods and Results. To study the cyclone numerically, the polar version of the mesoscale WRF model was used. In the performed numerical experiment, the sea ice in the computational domain was replaced by water the temperature of which was 271.46 K. To identify the main factors amplifying the polar mesoscale cyclone, the balance equation for the space-average cyclone kinetic energy was applied. The basic components of the kinetic energy balance equation were considered: the work of pressure gradient force, F_{pres} , the advection effect and the work of inertial forces Adv , and also the work of turbulent friction force F_{fric} . It was found that the removal of sea ice from the computational domain had resulted in a decrease of the polar mesoscale cyclone intensity. The values of F_{pres} , Adv and F_{fric} in the main calculation were quantitatively compared to those in the experiment, and it was shown that the intensity decrease had become mainly a result of a decrease in F_{pres} and Adv .

Conclusions. Decrease of F_{pres} is a consequence of the fact that in the control run, the northern part of the polar mesoscale cyclone was located above the sea ice, and the surface air temperature in this part was 25–30 °C lower than in the southern one. The removal of sea ice led to an increase in surface air temperature at the cyclone periphery and to a decrease in the surface pressure drop between the vortex center and periphery. The Adv decrease is related to deformation of the cyclone in the experiment, which resulted in increase in the fluctuating component of the azimuthal and radial velocities. Both of these factors have led to a decrease of the polar mesoscale cyclone intensity in the experiment.

Keywords: polar mesoscale cyclone, mesoscale atmospheric modeling, numerical experiment, sea ice, WRF model, energy balance

Acknowledgements: The study was carried out within the framework of project FNNN-2021-0002 “Fundamental studies of interaction processes in the ocean-atmosphere system determining regional spatial-temporal variability of natural environment and climate” (code “Ocean-atmosphere interaction”).

For citation: Iarovaia, D.A. and Efimov, V.V., 2023. Energy Balance in the Polar Mesoscale Cyclone over the Barents Sea. *Physical Oceanography*, 30(1), pp. 3-17. doi:10.29039/1573-160X-2023-1-3-17

Введение

В зимнее время года в Северо-Европейском бассейне часто наблюдаются такие экстремальные явления погоды, как полярные мезомасштабные циклоны (ПМЦ) [1]. Согласно работе ¹ и [2], к ПМЦ относятся интенсивные (со скоростью приводного ветра больше 15 м/с) циклоны с диаметром до 600 км, которые возникают и усиливаются над морями в высоких широтах. В большинстве случаев формирование полярных мезоциклонов связано с вторжениями холодного воздуха на море [3, 4] и происходит над открытой водой в 100-километровой зоне от холодной суши или кромки морского льда [5], т. е.

¹ Noer G., Lien T. Dates and positions of Polar Lows over the Nordic Seas between 2000 and 2010 // Met.no Report. 2010. No. 16/2010. 7 p. URL: https://www.met.no/publikasjoner/met-report/met-report-2010/_/attachment/download/5e0da025-5d16-42a7-a273-79ad860a6119:13dada8d9f3a71cd2c899b1b79f3b6e4bf81fe04/MET-report-16-2010.pdf (date of access: 10.01.2023).

в области больших горизонтальных градиентов приповерхностной температуры. В Северо-Европейском бассейне большинство ПМЦ образуются в области между о. Шпицберген и побережьем Норвегии [6, 7]. Это объясняется частыми вторжениями холодного воздуха из покрытой льдом северной части бассейна и клиновидной формой острова, которая способствует конвергенции над морем воздушных потоков, огибающих остров. Исследования роли, которую играет морской лед в усилении ПМЦ, проводились неоднократно. Результаты этих исследований неоднозначны.

Так, в климатическом исследовании ПМЦ Северо-Европейского бассейна по данным реанализа [6] не было выявлено заметной связи между частотой появления, интенсивностью ПМЦ и площадью морского льда. В [8] при помощи численных экспериментов на примере двух случаев 4 апреля 2007 г. и 29 января 2008 г. было показано, что морской ледовый покров к востоку от Шпицбергена влияет на развитие ПМЦ, хотя и несущественно.

В [9] рассматривался ПМЦ 29 февраля 2008 г., который рассеялся после выхода на область моря, покрытую морским льдом. Было получено, что удаление морского льда из расчетной области привело к увеличению продолжительности ПМЦ. В [2] по данным наблюдений было выявлено относительное увеличение количества ПМЦ в районе Шпицбергена в 2006–2013 гг. Вероятной причиной этого авторы [2] назвали сокращение ледового покрова в Баренцевом море в эти годы.

В [10] было показано, что сокращение ледового покрова Арктики привело к появлению ПМЦ там, где они ранее не наблюдались, а именно над морями, лежащими к востоку от Новой Земли (Карское море, море Лаптевых и Восточно-Сибирское море). В [11] было проведено сравнение активности ПМЦ над восточным сектором Евразийской Арктики при аномально низкой (2007 г.) и аномально высокой (2014 г.) ледовитости и показано, что связь между количеством ПМЦ и площадью ледового покрова наблюдалась только для моря Лаптевых и Восточно-Сибирского моря.

В данной работе, как и в предыдущих [12–14], мы продолжаем исследовать отдельные случаи интенсивных полярных мезоциклонов с целью выявления основных факторов их усиления. Цель работы – проверить, как изменение ледового покрова в районе о. Шпицберген повлияет на развитие интенсивного ПМЦ.

Методы исследования

Для исследования циклона использовалась полярная версия численной модели атмосферной циркуляции *WRF 4.1.1*, хорошо известная в литературе². В модели использовались 37 неравномерно расположенных по высоте *eta*-уровней с увеличенным разрешением в планетарном пограничном слое (ППС); количество уровней указано для несмещенной вертикальной сетки. Для параметризации ППС была выбрана схема *Yonsei University*. Для параметризации приповерхностного слоя использовалась схема *Revised MM5 Monin – Obukhov scheme*.

² A description of the advanced research WRF Version 3 / W. C. Skamarock [et al.]. University Corporation for Atmospheric Research, 2008. 113 p. (NCAR Technical Notes ; No. NCAR/TN-475+STR). <http://dx.doi.org/10.5065/D68S4MVH>

Начальные и граничные условия были взяты из данных оперативного анализа *GFS* с пространственным разрешением $0,25^\circ$ и временным разрешением 6 ч. Результаты моделирования выводились с шагом 1 ч. Моделирование проводилось на двух вложенных расчетных сетках с разрешением 15 и 5 км. Температура поверхности моря при моделировании поддерживалась постоянной.

Чтобы определить, как повлиял на развитие ПМЦ лед в северной части Баренцева моря, был проведен численный эксперимент, в котором морской лед в расчетной области заменили открытой водой с температурой поверхности $271,46\text{ К}$ (температура замерзания морской воды). В других работах [8, 9] при проведении подобного эксперимента также использовалась температура замерзания морской воды, чтобы доопределить поле температуры поверхности моря после удаления морского льда.

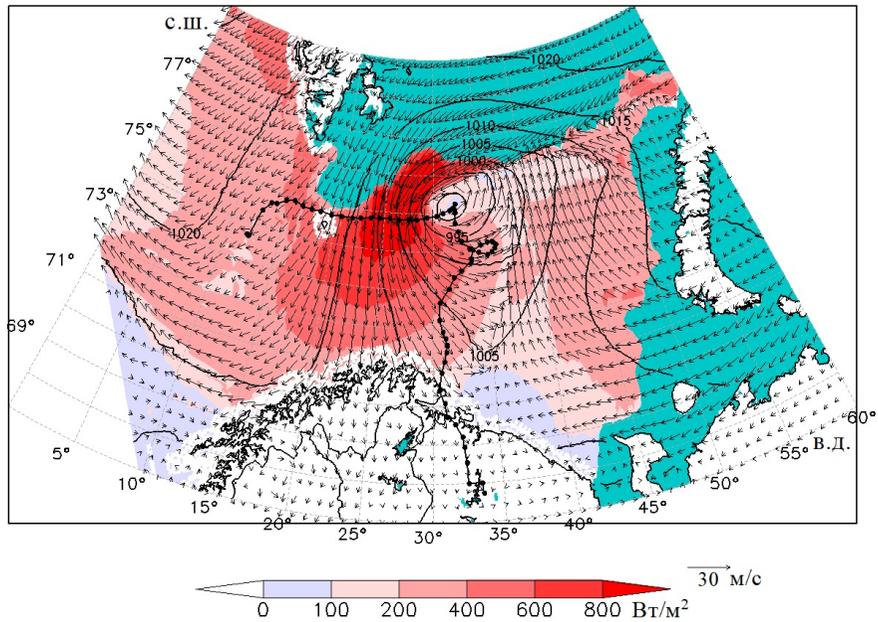
Для исследования структуры ПМЦ использовали цилиндрическую систему координат, центр которой совпадает с центром циклона и перемещается вместе с ним. Радиус ПМЦ определялся по положению последней замкнутой изобары в поле давления на уровне моря, изобары были проведены с шагом 1 гПа.

Для исследования механизмов усиления как тропических, так и среднеширотных циклонов используют уравнение баланса кинетической энергии циклона [15–17]. В зависимости от поставленной задачи можно рассматривать кинетическую энергию всех движений в области циклона (фоновый поток + циркуляция, связанная с циклоном), или только кинетическую энергию вращения, или только кинетическую энергию горизонтальных движений. Это позволяет непосредственно оценить вклад различных факторов на интересующую нас величину.

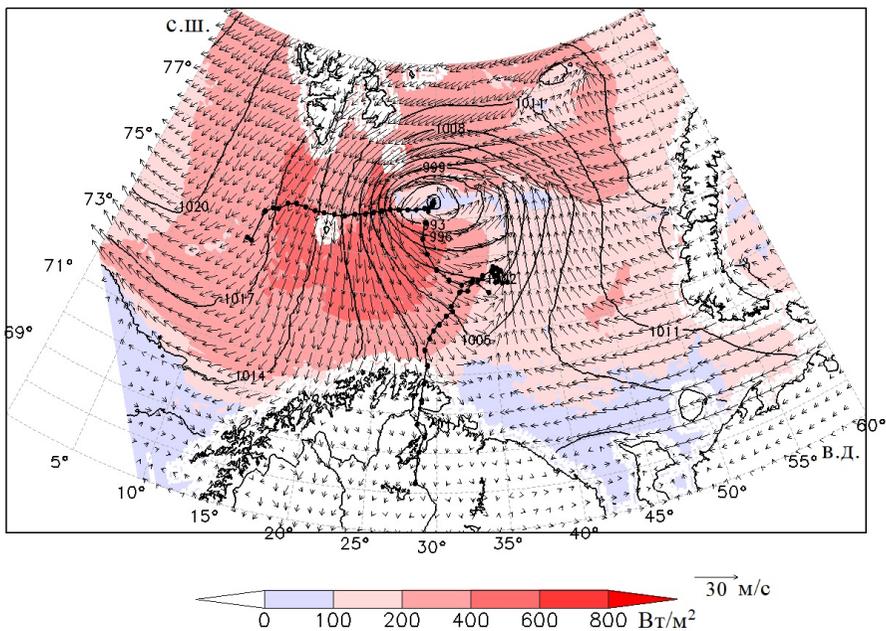
Описание ПМЦ и результаты основного расчета

В этом разделе кратко опишем развитие исследуемого полярного мезоциклона. Как видно из рис. 1, *a*, в марте северо-восточная часть рассматриваемой области была покрыта льдом. ПМЦ возник на границе Гренландского и Баренцева морей и в течение суток, с 06:00 15 марта до 06:00 16 марта 2021 г., постепенно усиливаясь, перемещался над морем на восток вдоль кромки льда. В 06:00 16 марта ПМЦ достиг зрелой стадии, приповерхностная скорость ветра в нем достигала 30 м/с, а суммарный (явный + скрытый) поток от поверхности моря – 1000 Вт/м^2 . Столь большие значения потока тепла обусловлены тем, что на протяжении всей стадии развития северная часть циклона находилась над льдом, в результате чего температура приповерхностного воздуха там была на $25\text{--}30\text{ }^\circ\text{C}$ ниже, чем в южной части. Перенос холодного воздуха с покрытой льдом части моря на открытое море привел к выхолаживанию там нижнего слоя высотой около 400 м и, как следствие, к значительному увеличению устойчивости (т. е. к большому вертикальному градиенту потенциальной температуры).

Отметим, что в восточной части области также наблюдался приход холодного воздуха из покрытой морским льдом области, но препятствие в виде горного хребта Новой Земли не давало развиваться большой приповерхностной скорости ветра, и потоки тепла там были относительно невелики (рис. 1).



a



b

Рис. 1. Суммарный поток тепла от поверхности моря ($\text{Вт}/\text{м}^2$), приводная скорость ветра ($\text{м}/\text{с}$) и давление на уровне моря (гПа) на зрелой стадии развития циклона для основного расчета (*a*) и численного эксперимента (*b*). Зеленым цветом обозначена часть моря, покрытая льдом. Черными точками показана траектория ПМЦ

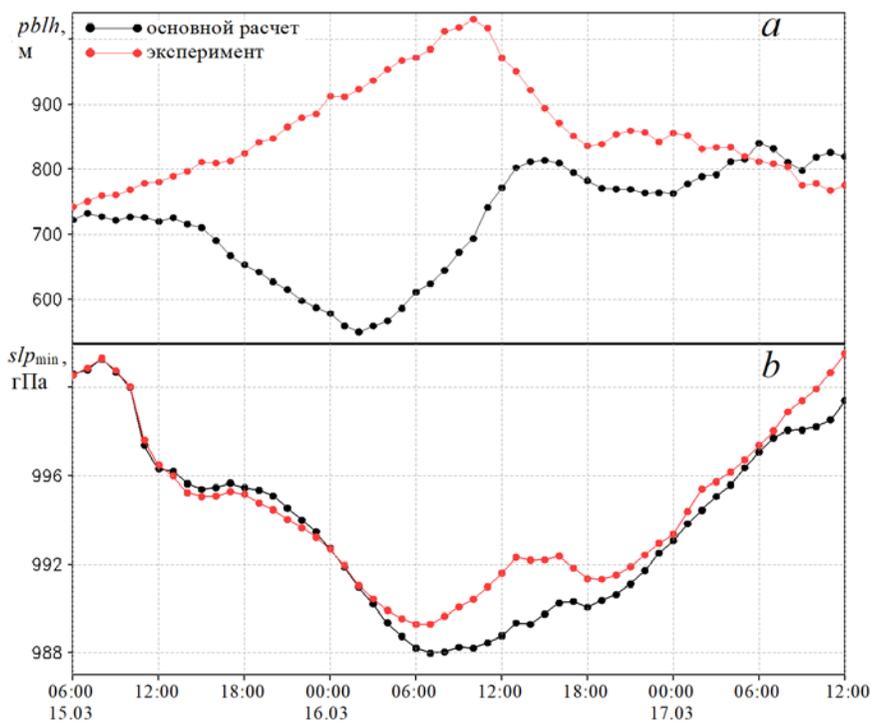
Fig. 1. Total heat flux from the sea surface (W/m^2), surface wind speed (m/s) and sea level pressure (hPa) at the mature stage of cyclone development for the control run (*a*) and the numerical experiment (*b*). The sea part covered with ice is marked in green. Black dots show the PMC trajectory

После 06:00 16 марта ПМЦ изменил направление движения на юго-восточное, с 17 марта начал перемещаться на юг и к 18:00 вышел на сушу. По мере удаления от покрытой льдом части моря интенсивность ПМЦ непрерывно уменьшалась, за исключением периода 16:00–19:00 16 марта, о котором будет сказано ниже. Скорость перемещения ПМЦ над морем на восток/юг на стадии развития/затухания составляла ~ 30 км/ч.

Отметим, что в начальных условиях модели (реанализ *GFS* за 00:00 15 марта) в поле давления на уровне моря к юго-западу от о. Шпицберген присутствует барическая ложбина, в которой на третьем часу моделирования появляются замкнутые изобары, а к 06:00 15 марта формируется циклонический вихрь, впоследствии усилившийся до ПМЦ. Таким образом, можно считать, что модель сумела воспроизвести появление ПМЦ по начальным условиям, благоприятным для его зарождения.

Основные результаты эксперимента

Целью численного эксперимента было проверить, как повлияет на развитие ПМЦ удаление морского льда из расчетной области. Как видно из рис. 1, траектория циклона в эксперименте почти не изменилась по сравнению с основным расчетом и, соответственно, почти не изменилось время наступления зрелой стадии развития ПМЦ.



Р и с. 2. Сравнение результатов основного расчета и эксперимента: *a* – высота ППС, осредненная по площади вихря (м), *pblh*; *b* – давление в центре ПМЦ (гПа), *slp_{min}*

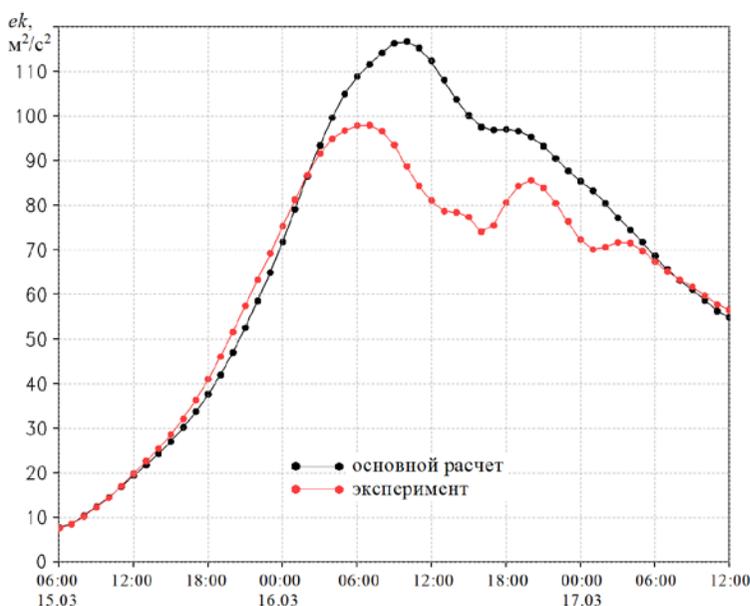
Fig. 2. Comparison of the results of the control run and the experiment: *a* – area-average PBL height (m), *pblh*; *b* – pressure in the PMC center (hPa), *slp_{min}*

Основное различие между расчетами оказалось следующим. После удаления морского льда приповерхностный воздух в северной части ПМЦ имеет более высокую температуру. Это привело к тому, что потоки явного и скрытого тепла в западной части ПМЦ уменьшились вследствие уменьшения разности температур море – атмосфера. Напомним, что температура поверхности не покрытой льдом части моря одинакова в обоих расчетах. Кроме того, на зрелой стадии развития циклона средняя по области вихря высота пограничного слоя стала больше почти в два раза (рис. 2, *a*), а устойчивость атмосферы, т. е. средняя по высоте ППС частота плавучести, уменьшилась в восемь раз.

На рис. 2, *b* и 3, *a* показано, как изменялись интенсивность ПМЦ (давление на уровне моря в центре вихря) и средняя по объему вихря кинетическая энергия горизонтальных движений ek .

Как видно из рис. 3, *a*, в обоих расчетах значение ek сначала возрастает до 06:00 16 марта, затем наступает зрелая стадия развития ПМЦ длительностью ~ 3–4 часов, когда ek меняется слабо. Помимо основного максимума ek , связанного с наступлением зрелой стадии, на обоих графиках можно выделить участок 16:00–19:00 16 марта, когда величина ek почти не убывает (основной расчет) или даже возрастает (эксперимент). Такое поведение объясняется прохождением высотного мезоциклона, который пришел на Баренцево море с севера и после 18:00 16 марта располагался над ПМЦ.

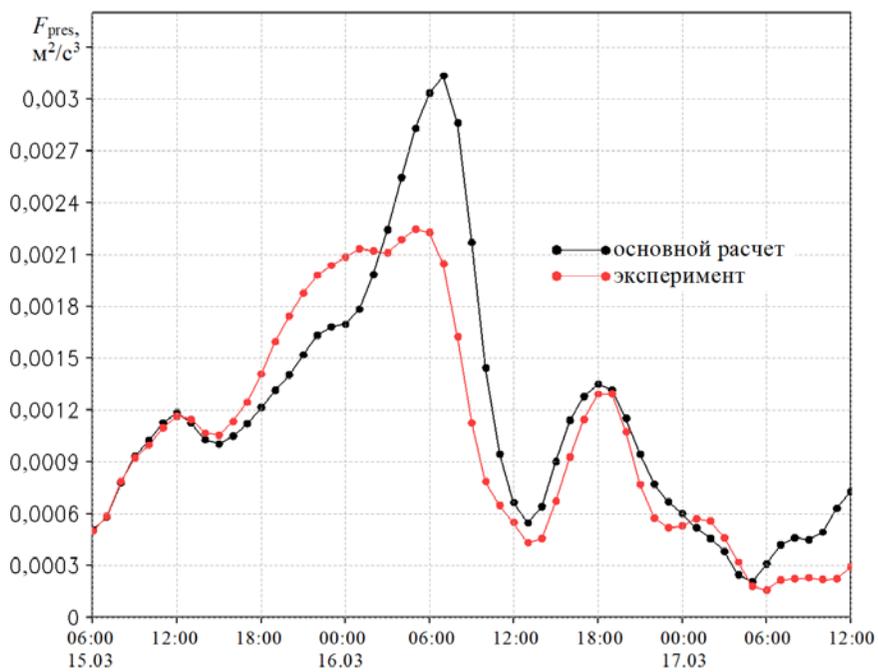
Таким образом, численный эксперимент показал, что, несмотря на уменьшение устойчивости ППС, ПМЦ не достиг той же интенсивности, что в основном расчете. Причина этого будет разьяснена ниже.



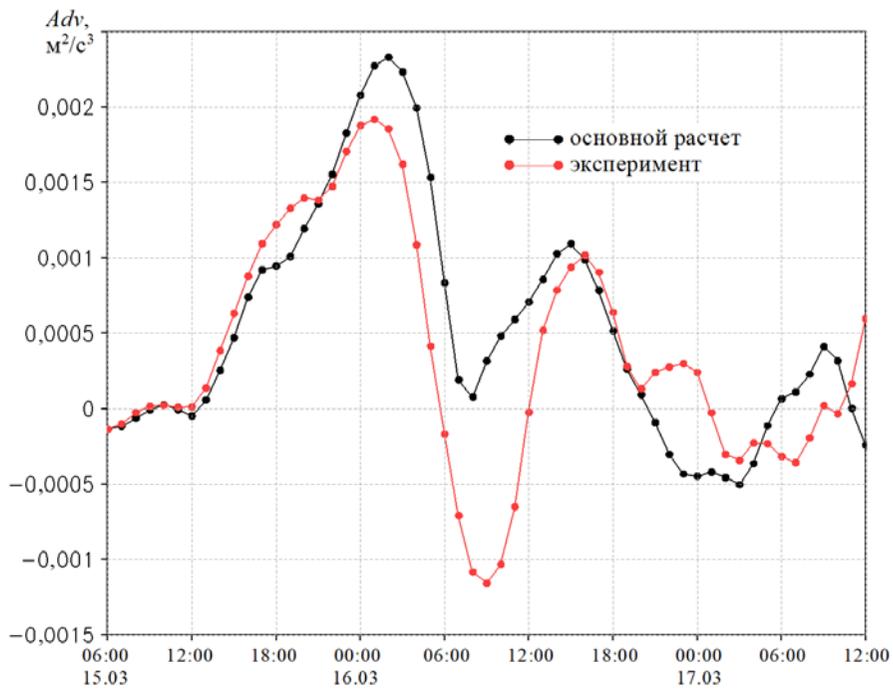
a

Р и с. 3. Сравнение результатов основного расчета и эксперимента: средние по объему вихря кинетическая энергия (m^2/c^2) (*a*) и слагаемые в правой части уравнения (1) F_{pres} (m^2/c^3) (*b*), Adv (m^2/c^3) (*c*), F_{fric} (m^2/c^3) (*d*)

F i g. 3. Comparison of the results of the control run and the experiment: averaged over the vortex volume values of kinetic energy (m^2/s^2) (*a*) and terms on the right side of equation (1) F_{pres} (m^2/s^3) (*b*), Adv (m^2/s^3) (*c*) and F_{fric} (m^2/s^3) (*d*)

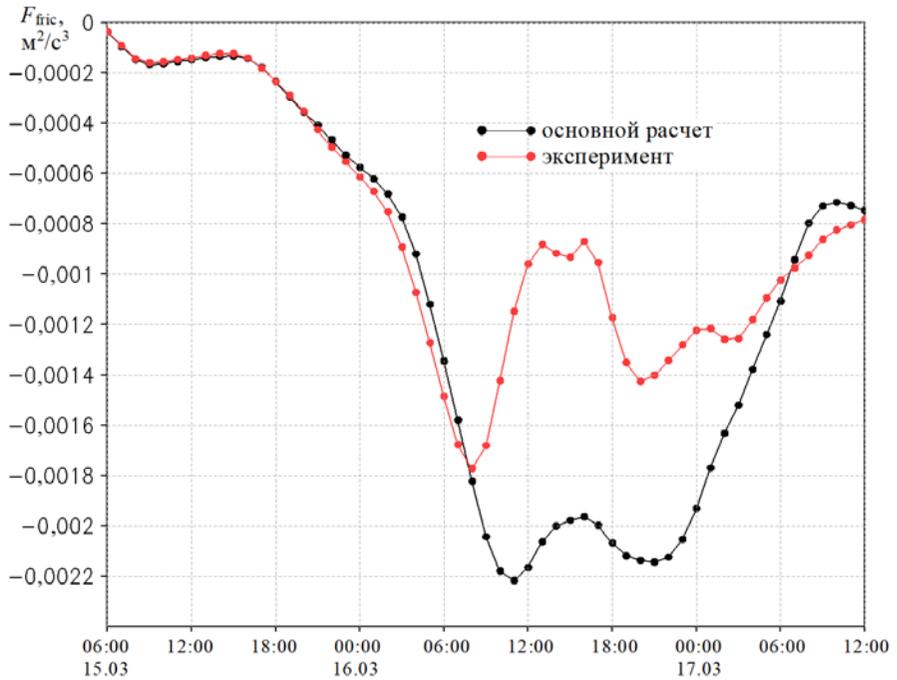


b



c

Продолжение рис. 3



d

Окончание рис. 3

Баланс энергии циклона

В этом разделе рассмотрим по отдельности основные факторы, которые повлияли на изменение кинетической энергии ПМЦ. Для этого используем уравнение баланса кинетической энергии, осредненной по азимутальному углу в цилиндрической системе координат:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\overline{V_\phi^2} + \overline{V_r^2}}{2} \right) = F_{\text{pres}} + Adv + F_{\text{fric}}, \quad (1)$$

где черта сверху означает осреднение по азимутальному углу; V_ϕ и V_r – азимутальная и радиальная компоненты скорости, т. е. скорость вращения вихря и скорость притока/оттока воздуха к центру вихря; $F_{\text{pres}} = -\overline{V_r} \cdot \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r}$ – работа силы, обусловленной радиальным градиентом давления;

$$Adv = -\overline{V_r} \left(\overline{V_r \frac{\partial V_r}{\partial r}} + \overline{V_z \frac{\partial V_r}{\partial z}} - \frac{\overline{V_\phi^2}}{r} \right) - \overline{V_\phi} \left(\overline{V_r \frac{\partial V_\phi}{\partial r}} + \overline{V_z \frac{\partial V_\phi}{\partial z}} + \frac{\overline{V_r V_\phi}}{r} \right) \quad (2)$$

– изменение кинетической энергии за счет адвекции импульса и работы сил инерции (r – расстояние от центра вихря);

$$F_{\text{fric}} = \bar{V}_r \cdot \frac{\partial}{\partial z} \left(K \frac{\partial V_r}{\partial z} \right) + \bar{V}_\varphi \cdot \frac{\partial}{\partial z} \left(K \frac{\partial V_\varphi}{\partial z} \right) \quad (3)$$

– изменение энергии за счет работы силы турбулентного трения. Здесь K – коэффициент вертикального турбулентного обмена (рассчитывается в модели); z – высота уровня модели. Величины F_{pres} , Adv и F_{fric} оценивали непосредственно по результатам моделирования. При аппроксимации формулы (3) конечными разностями было учтено, что на поверхности земли турбулентные напряжения трения не параметризуются через замыкание первого порядка, а пропорциональны квадрату скорости трения.

Кинетическая энергия вихря, по сути, представляет собой кинетическую энергию вращения, так как величина \bar{V}_φ^2 на два порядка больше \bar{V}_r^2 . Но увеличение азимутального импульса частицы происходит под действием силы Кориолиса благодаря радиальному движению воздуха на нижних уровнях к центру вихря, которое обеспечивается радиальной силой $-\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r}$.

На рис. 3, *b – d* показано, как изменялись со временем средние по объему вихря значения F_{pres} , Adv и F_{fric} – основные составляющие баланса средней кинетической энергии ПМЦ.

В обоих расчетах заметно резкое уменьшение F_{pres} после 06:00 16 марта, что объясняет начавшееся затухание ПМЦ (рис. 3, *a, b*). Прохождение упомянутого выше высотного циклона приводит к небольшому кратковременному увеличению F_{pres} с 16:00 до 19:00 16 марта.

Как видно из рис. 3, *c*, в обоих расчетах заметный вклад в изменение кинетической энергии вносило слагаемое Adv . Анализ составляющих величины Adv показал, что некоторыми слагаемыми в выражении (2) можно пренебречь и записать выражение для Adv в виде

$$Adv \approx -\bar{V}_\varphi V_r \frac{\partial V_\varphi}{\partial r} - \bar{V}_\varphi V_z \frac{\partial V_\varphi}{\partial z} + \frac{\bar{V}_r V_\varphi^2 - \bar{V}_\varphi V_r V_\varphi}{r}. \quad (2a)$$

Первые два слагаемых в правой части формулы (2a) описывают изменение ek за счет радиальной и вертикальной адвекции азимутального импульса. Азимутальная скорость V_φ уменьшается при удалении от центра вихря, начиная с $r > 30$ км, и убывает с высотой, начиная с уровня 1 км. То есть в большей части ПМЦ радиальный и вертикальный градиенты V_φ отрицательны. Первое слагаемое в формуле (2a) отрицательно на нижних уровнях, $z < 1,5$ км, где происходит приток воздуха ($V_r < 0$), и положительно на верхних уровнях, $z > 1,5$ км, где происходит отток ($V_r > 0$). Второе слагаемое в формуле (2a) дает положительный вклад в изменение ek . Это слагаемое достигает больших значений на уровнях 1,5–2 км, где в ПМЦ отмечены сильные восходящие потоки со скоростью V_z до 2,5 м/с.

Согласно рис. 3, *d*, диссипация кинетической энергии в эксперименте существенно меньше, чем в основном расчете. Это объясняется следующим образом. Анализ величины F_{fric} показал, что основной вклад в затухание

циклона вносит составляющая $-K \left(\frac{\partial \bar{V}_\varphi}{\partial z} \right)^2$. Согласно [18], коэффициент

вертикального турбулентного обмена в схеме *Yonsei University* сильно зависит от стратификации ППС: неустойчивая стратификация способствует вертикальному перемешиванию. В эксперименте произошло уменьшение устойчивости ППС, что привело к увеличению коэффициента K . Но, с другой стороны, ППС в эксперименте лучше перемешан и вертикальный градиент $\frac{\partial \bar{V}_\varphi}{\partial z}$

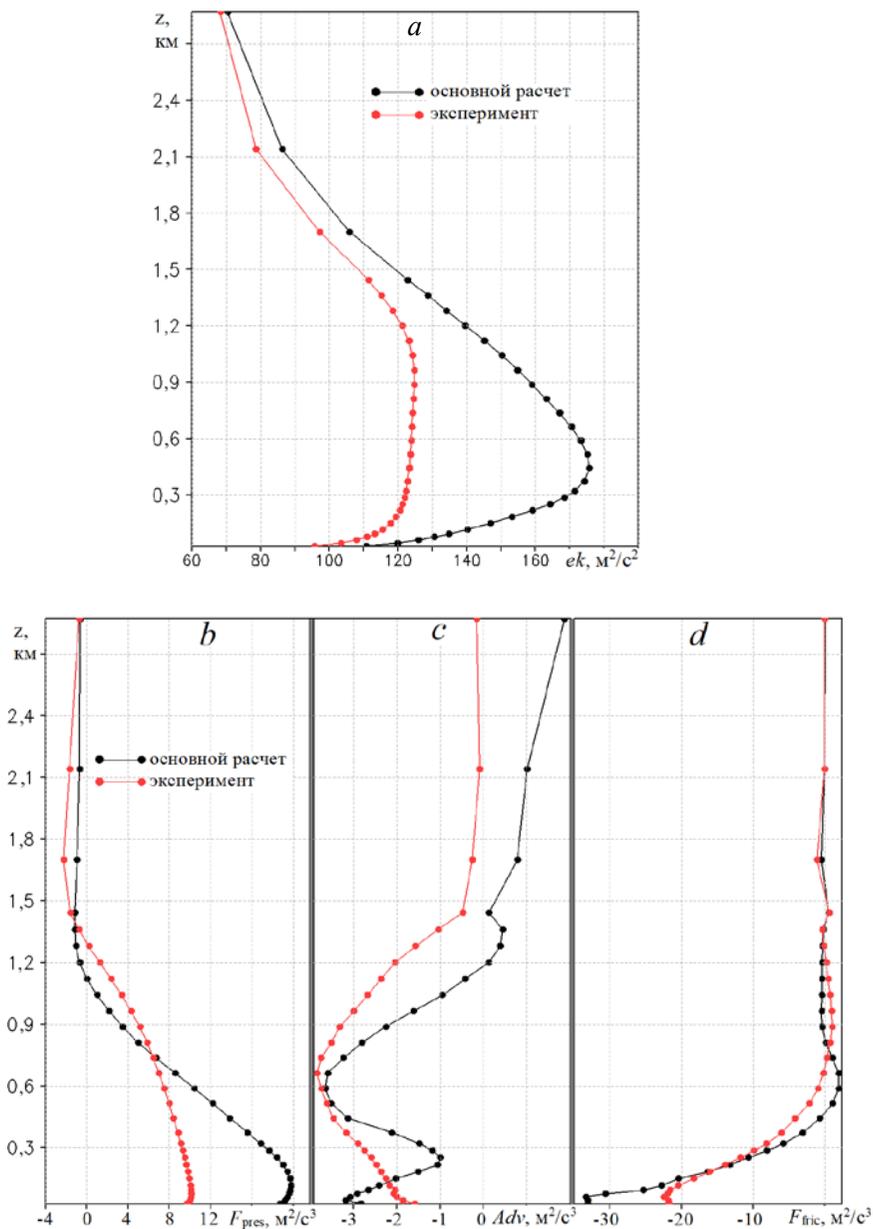
мал (рис. 4, *a*). Последнее обстоятельство стало причиной уменьшения F_{fric} .

Рассмотрим теперь, как распределены по высоте средние по площади вихря значения F_{pres} , Adv и F_{fric} (рис. 4). Влияние слагаемого F_{pres} на изменение кинетической энергии ПМЦ сосредоточено в слое $z < 1,5$ км, где велики радиальная скорость притока воздуха и радиальный градиент давления (рис. 4, *b*). Как видно из рис. 3, *b*, 4, *b*, на зрелой стадии значение F_{pres} в эксперименте меньше, чем в основном расчете. Рассмотрим, с чем это связано. На рис. 5 показано, какие изменения произошли в термобарической структуре ПМЦ после того, как морской лед в расчетной области заменили открытой водой. Приповерхностная температура во внешней части ПМЦ ($r > 150$ км) ожидаемо увеличилась (рис. 5, *a*). Вследствие этого на нижних уровнях уменьшился перепад давления между центром и периферией вихря (рис. 5, *b*). Уменьшение составило ~ 2 гПа.

Как видно из рис. 4, *c*, в эксперименте произошло существенное уменьшение величины Adv . Это связано с тем, что структура вихря в эксперименте заметно отклоняется от осесимметричной, имеет форму, близкую к эллипсу (см. рис. 1), т. е. велики отклонения скоростей от средних азимутальных значений. Проиллюстрируем это при помощи рис. 6, на котором показаны дисперсия азимутальной скорости $\overline{V_\varphi'^2}$ и ковариация $\overline{V_\varphi'V_r'}$, где штрих означает пульсацию скорости, т. е. отклонение от среднего азимутального значения. Деформация ПМЦ привела к большим значениям дисперсии $\overline{V_\varphi'^2}$ на уровнях $z < 1,5$ км и большим значениям ковариации $\overline{V_\varphi'V_r'}$ на уровнях $z > 1,5$ км (рис. 6). Таким образом, отрицательные значения Adv (рис. 3, *c*) с 06:00 до 12:00 16 марта в эксперименте объясняются произошедшей деформацией вихря, в результате чего кинетическая энергия пульсаций увеличилась за счет убыли кинетической энергии среднего движения.

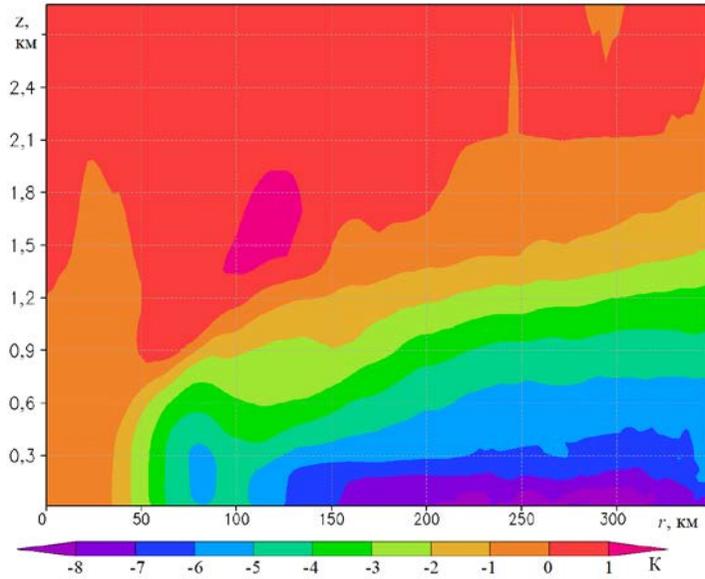
Как видно из рис. 4, *d*, влияние слагаемого F_{fric} сосредоточено в нижнем слое до 500 м, где и произошло основное уменьшение силы турбулентного трения.

Таким образом, можно назвать основные причины на первый взгляд парадоксального уменьшения средней кинетической энергии ПМЦ в эксперименте с удалением морского ледового покрова. Исключение морского льда из расчетной области привело к уменьшению радиального градиента температуры в нижней части атмосферы и, как следствие, к уменьшению F_{pres} . Дополнительным фактором стала деформация вихря: форма вихря сильно отклонилась от осесимметричной, что привело к уменьшению кинетической энергии вращения.

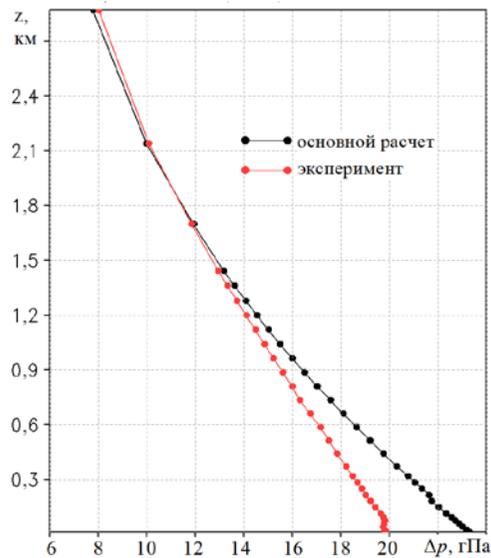


Р и с. 4. Сравнение результатов основного расчета и эксперимента: изменение с высотой средних по площади вихря значений кинетической энергии ($\text{м}^2/\text{с}^2$) (a), F_{pres} ($\text{м}^2/\text{с}^3$) (b), F_{adv} ($\text{м}^2/\text{с}^3$) (c), F_{fric} ($\text{м}^2/\text{с}^3$) (d) в 08:00 16 марта

Fig. 4. Comparison of the results of the control run and the experiment. Change with height of the values averaged over the vortex area: kinetic energy (m^2/s^2) (a), F_{pres} (m^2/s^3) (b), F_{adv} (m^2/s^3) (c) and F_{fric} (m^2/s^3) (d) at 08:00 on March, 16



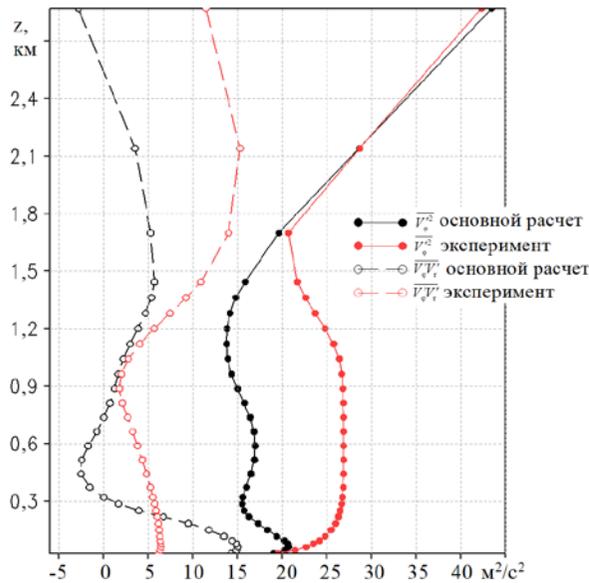
a



b

Р и с. 5. Осредненная по азимутальному углу разность между потенциальной температурой в основном расчете и эксперименте (К), по оси абсцисс отложено расстояние от центра вихря, по оси ординат – высота над уровнем моря (*a*); разницa между давлением на периферии и в центре ПМЦ (гПа), Δp , в 08:00 16 марта для основного расчета и эксперимента (*b*)

Fig. 5. Difference between the potential temperatures in the control run and in the experiment (K) averaged over the azimuth angle, abscissa shows the distance from the vortex center, ordinate shows the height above the sea level (*a*); difference between the pressures at the PMC periphery and in its center (hPa), Δp , at 08:00 on March, 16 for the control run and the experiment (*b*)



Р и с. 6. Дисперсия пульсационной азимутальной скорости $\overline{V_\phi'^2}$ (m^2/c^2) и ковариация пульсационных азимутальной и радиальной скоростей $\overline{V_\phi'V_r'}$ (m^2/c^2) в 08:00 16 марта для основного расчета и эксперимента

Fig. 6. Dispersion of fluctuating azimuthal speed $\overline{V_\phi'^2}$ (m^2/s^2) and covariance of fluctuating azimuthal and radial speeds $\overline{V_\phi'V_r'}$ (m^2/s^2) at 08:00 on March, 16 for the control run and the experiment

Заклучение

Мы рассмотрели интенсивный полярный мезоциклон, северная часть которого на стадии развития располагалась надо льдом. Усиление ПМЦ было вызвано большими потоками тепла от поверхности моря вследствие переноса холодного воздуха из области, покрытой морским льдом, на открытое море.

Мы провели численный эксперимент с целью проверить влияние морского льда в расчетной области на структуру и интенсивность развитого полярного мезоциклона, оценили вклад различных факторов в изменение средней кинетической энергии ПМЦ.

Было получено, что, хотя в эксперименте увеличилась неустойчивость пограничного слоя, интенсивность ПМЦ несколько уменьшилась.

Уменьшение интенсивности ПМЦ в эксперименте было вызвано двумя факторами. Первый – это увеличение средней по азимутальному углу приповерхностной температуры на периферии ПМЦ, что привело к уменьшению радиального градиента давления на нижних уровнях. На зрелой стадии развития ПМЦ перепад давления между центром и периферией циклона вблизи поверхности оказался на ~ 2 гПа меньше. Как следствие, величина F_{pres} , которая является основным источником энергии ПМЦ, не достигает в эксперименте таких же больших значений, как в основном расчете. Вторым фактором стала деформация ПМЦ, в результате чего кинетическая энергия вращения вихря уменьшилась, перейдя в кинетическую энергию пульсаций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Rasmussen E., Turner J.* Polar lows: Mesoscale Weather Systems in the Polar Regions. Cambridge : Cambridge University Press, 2003. 612 p. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511524974>
2. Polar low tracks over the Nordic Seas: a 14-winter climatic analysis / M. Rojo [et al.] // *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*. 2015. Vol. 67, iss. 1. 24660. <https://doi.org/10.3402/tellusa.v67.24660>
3. Characteristics of cold-air outbreak events and associated polar mesoscale cyclogenesis over the North Atlantic Region / A. Terpstra [et al.] // *Journal of Climate*. 2021. Vol. 34, iss. 11. P. 4567–4584. doi:10.1175/JCLI-D-20-0595.1
4. *Kolstad E. W.* A global climatology of favourable conditions for polar lows // *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 2011. Vol. 137, iss. 660. P. 1749–1761. doi:10.1002/qj.888
5. *Stoll P. J.* A global climatology of polar lows investigated for local differences and wind-shear environments // *Weather and Climate Dynamics*. 2022. Vol. 3, iss. 2. P. 483–504. <https://doi.org/10.5194/wcd-3-483-2022>
6. *Michel C., Terpstra A., Spengler T.* Polar mesoscale cyclone climatology for the Nordic Seas based on the ERA-Interim // *Journal of Climate*. 2018. Vol. 31, iss. 6. P. 2511–2532. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0890.1>
7. A climatological study of polar lows in the Nordic Seas / G. Noer [et al.] // *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 2011. Vol. 137, iss. 660. P. 1762–1772. doi:10.1002/qj.846
8. *Sergeev D., Renfrew I. A., Spengler T.* Modification of polar low development by orography and sea ice // *Monthly Weather Review*. 2018. Vol. 146, iss. 10. P. 3325–3341. doi:10.1175/MWR-D-18-0086.1
9. *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 // *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 2011. Vol. 137, iss. 660. P. 1716–1730. doi:10.1002/qj.856
10. *Zabolotskikh E. V., Gurvich I. A., Chapron B.* New areas of polar lows over the Arctic as a result of the decrease in sea ice extent // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2015. Vol. 51, iss. 9. P. 1021–1033. EDN WTNEGF. doi:10.1134/S0001433815090200
11. *Гурвич И. А., Заболотских Е. В., Пичугин М. К.* Особенности мезомасштабного циклогенеза над восточным сектором Евразийской Арктики // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2016. Т. 13, № 5. С. 227–237. EDN ХАЕWWX. doi:10.21046/2070-7401-2016-13-5-227-237
12. *Яровая Д. А., Ефимов В. В.* Численные эксперименты по чувствительности полярного мезоциклона над Баренцевым морем к источникам тепла // *Морской гидрофизический журнал*. 2020. Т. 36, № 3. С. 243–260. doi:10.22449/0233-7584-2020-3-243-260
13. *Ефимов В. В., Яровая Д. А., Комаровская О. И.* Мезомасштабный полярный циклон по спутниковым данным и результатам численного моделирования // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2020. Т. 17, № 1. С. 223–233. EDN GYWGNW. doi:10.21046/2070-7401-2020-17-1-223-233
14. *Яровая Д. А., Ефимов В. В.* Развитие мезомасштабного циклона 1–3 сентября 2015 г. по спутниковым данным и результатам численного моделирования // *Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана*. 2020. Т. 56, № 6. С. 626–637. EDN JBEQFW. doi:10.31857/S0002351520060115.
15. *Smith R. K., Montgomery M. T., Kilroy G.* The generation of kinetic energy in tropical cyclones revisited // *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 2018. Vol. 144, iss. 717. P. 2481–2490. <https://doi.org/10.1002/qj.3332>
16. Roles of an upper-level cold vortex and low-level baroclinicity in the development of polar lows over the Sea of Japan / U. Shimada [et al.] // *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*. 2014. Vol. 66, iss. 1. 24694. doi:10.3402/tellusa.v66.24694

17. Kinetic energy budget during the genesis period of Tropical Cyclone Dorian (2001) in the South China Sea / Y. Wang [et al.] // Monthly Weather Review. 2016. Vol. 144, iss. 8. P. 2831–2854. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-15-0042.1>
18. Hong S., Noh Y., Dudhia J. A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes // Monthly Weather Review. 2006. Vol. 134, iss. 9. P. 2318–2341. <https://doi.org/10.1175/MWR3199.1>

Об авторах:

Яровая Дарья Александровна, старший научный сотрудник, отдел взаимодействия атмосферы и океана, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат физико-математических наук, **ResearcherID: Q-4144-2016**, **ORCID ID: 0000-0003-0949-2040**, **Scopus Author ID: 57205741734**, darik777@mhi-ras.ru

Ефимов Владимир Васильевич, заведующий отделом взаимодействия атмосферы и океана, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), доктор физико-математических наук, профессор, **ResearcherID: P-2063-2017**, **Scopus Author ID: 6602381894**, vefim38@mail.ru