

Гидрометеорология и экология. 2024. № 76. С. 422—436.
Hydrometeorology and Ecology. 2024;(76):422—436.

МЕТЕОРОЛОГИЯ

Научная статья
УДК [551.515.1:551.551]:004.94
doi: 0.33933/2713-3001-2024-76-422-436

Влияние релаксационных методов ассимиляции на воспроизведение поля скорости ветра в полярном циклоне

***Всеволод Сергеевич Коляда¹, Павел Андреевич Голубкин^{1,2},
Юлия Ефимовна Смирнова¹***

¹ Научный фонд «Международный центр по окружающей среде и дистанционному зондированию имени Нансена», Санкт-Петербург, Россия, jostersplus@gmail.com

² Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Статья посвящена использованию методов ассимиляции данных для воспроизведения полярных циклонов атмосферной моделью WRF. Метод четырехмерной ассимиляции данных (FDDA) позволяет ассимилировать данные атмосферного реанализа ERA5, а также спутниковые наблюдения скаттерометров ASCAT. Всего было проведено три численных эксперимента, в которых показано влияние каждого компонента ассимиляции на получаемое поле ветра в одном и том же полярном циклоне. Полученные результаты показывают, что используемый метод ассимиляции данных улучшает оценку максимальных скоростей ветра в циклоне и предоставляет возможность более детально проследить его развитие.

Ключевые слова: полярный циклон, численное моделирование, ассимиляция данных, релаксационные методы ассимиляции, Северо-Европейский бассейн.

Благодарности: работа выполнена в рамках проекта Российского научного фонда № 22-27-00701.

Для цитирования: Коляда В. С., Голубкин П. А., Смирнова Ю. Е. Влияние релаксационных методов ассимиляции на воспроизведение поля скорости ветра в полярном циклоне // Гидрометеорология и экология. 2024. № 76. С. 422—436. doi: 0.33933/2713-3001-2024-76-422-436.

Original article

Influence of the four-dimensional data assimilation on the reproduction of polar low wind speed field

*Vsevolod S. Kolyada¹, Pavel A. Golubkin^{1, 2},
Julia E. Smirnova¹*

¹ Nansen International Environmental and Remote Sensing Centre, St. Petersburg, Russia

² St. Petersburg University, St. Petersburg, Russia

Summary. In this study three numerical experiments were performed to assess the influence of the four-dimensional data assimilation (FDDA) technique on the resulting polar low wind speed field configuration and their results were compared to the ASCAT satellite scatterometer and the ERA5 atmospheric reanalysis data. The experiments were conducted using the Weather Research and Forecasting (WRF) model with no data assimilation (first) and using FDDA with ERA5 data (second), and ERA5 and ASCAT data (third). ERA5 data were used as initial and boundary conditions for all model runs. The FDDA usage was shown to remarkably improve the resulting polar low wind speed fields yielding better correspondence to the satellite wind speeds in both magnitude and shape. In particular, the maximum wind speed area was localized in the right-hand side of the polar low further than 100 km from its center during the first experiment, while the scatterometer data indicated localization of this area within 50 km from the polar low center in its rear part. Wind speed fields calculated during the second and third runs (with FDDA) closely resemble this configuration. The highest wind speed values found during the third model run (23—25 m/s) are closer to the ASCAT scatterometer data (24 m/s) compared to those obtained during the second model run (21 m/s). While only single polar low was modelled in this study, the improvements introduced by the FDDA usage are assumed to be robust. As such, modelling with FDDA offers the advantages of both reanalysis (full spatial and temporal coverage) and satellite scatterometer (more accurate) data as well as higher spatial resolution (e.g., 3×3 km² grid used in this study compared to 0.25°×0.25° for ERA5 and 12.5×12.5 km² for ASCAT data), which enables better identification of small-scale areas with the highest values of wind speed within a polar low. This technique may therefore be used for forecasting of polar low formation and evolution as well as for more accurate risk assessment in polar low situations.

Keywords: polar low, numerical modelling, four-dimensional data assimilation, nudging, WRF, Nordic seas.

Acknowledgments: the study was conducted in frame of the Russian Science Foundation Project No 22-27-00701.

For citation: Kolyada V. S., Golubkin P. A., Smirnova J. E. Influence of the four-dimensional data assimilation on the reproduction of polar low wind speed field. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2024;(76):422—436. (In Russ.). doi: 0.33933/2713-3001-2024-76-422-436.

Введение

Полярные циклоны — интенсивные мезомасштабные атмосферные вихри, которые характерны для полярных регионов обоих полушарий Земли. С прохождением полярного циклона связаны такие опасные явления, как снижение видимости, обледенение судов, штормовые скорости ветра (до 33 м/с), интенсивные осадки, сильное ветровое волнение (свыше 8 м), высокие градиенты скорости ветра [1—4]. Все это представляет опасность не только для деятельности в открытом океане, но и для прибрежных инженерных сооружений.

Полярные циклоны остаются малоизученными явлениями по сравнению, например, с тропическими, исследования которых продолжаются более века. В первую очередь это связано с гораздо большей опасностью для населения, которую представляют тропические циклоны, обычно выходящие на берег в густонаселенных районах. Во-вторых, это связано с тем, что полярные циклоны наблюдаются в относительно удаленных полярных районах, где наблюдательная сеть имеет редкое покрытие. Полярные циклоны имеют в среднем размер около 300 км [5] и малое время существования, что не позволяет их отслеживать по синоптическим картам, поэтому до наступления эры спутниковых наблюдений о них было известно крайне мало.

В настоящее время основным инструментом мониторинга циклонов являются спутниковые данные, в частности, изображения в инфракрасном диапазоне, которые позволяют отслеживать формирование и развитие циклона, отмечать его центр и определять облачную структуру. Одним из регионов, где полярные циклоны формируются наиболее часто, является Северо-Европейский бассейн, который включает в себя Норвежское, Баренцево и Гренландское моря. В этом регионе в среднем за год образуется около 15—20 циклонов, причем наиболее часто это происходит с февраля по апрель, а продолжительность их существования чаще всего не превышает 36 ч [5].

Для оценки опасности, представляемой полярными циклонами, а также их влияния на морскую поверхность важным параметром является поле скорости ветра и его конфигурация в циклоне. Скорость ветра в циклонах обычно оценивается на основе данных спутниковых скаттерометров и атмосферных реанализов. Данные скаттерометров имеют ряд преимуществ перед данными реанализов. В частности, у них выше пространственное разрешение, а также точность, особенно при быстрой эволюции поля ветра, характерной для условий формирования и развития полярных циклонов. Однако покрытие наблюдениями непостоянно, иногда наблюдения невозможны в силу атмосферных условий, и один циклон может попасть в полосу обзора спутника лишь один-два раза, что не позволяет полноценно исследовать развитие поля ветра в циклоне. Основное преимущество реанализов состоит в том, что они предоставляют полное покрытие региона с высоким (до ежечасного) временным разрешением. К недостаткам относится невысокое пространственное разрешение, а также занижение скорости ветра по отношению к данным скаттерометров [6—8]. Кроме того, не все полярные циклоны воспроизводятся в атмосферных реанализах в силу своих небольших размеров и времени существования, а также сложных физических механизмов их образования. Использование методов численного моделирования с ассимиляцией спутниковых данных может представить преимущества обоих описанных выше типов данных для получения наиболее детальных полей скорости ветра в полярных циклонах.

Целью данной работы является оценка влияния применения релаксационных методов ассимиляции данных при численном моделировании полярного циклона на результирующее поле скорости ветра. Для этой цели было произведено три численных эксперимента с использованием атмосферной модели Weather Research

and Forecasting (WRF), результаты которых сравнивались с данными атмосферного реанализа European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) Re-Analysis 5 (ERA5) и данными спутниковых скаттерометров Advanced Scatterometer (ASCAT).

Исходные данные и методология

Исследуемый полярный циклон

Рассматривался полярный циклон в акватории Норвежского и Баренцева морей за период 04.03.2013 03:00 — 05.03.2013 03:00 (UTC), продолжительность существования которого составила около 24 ч. На рис. 1 представлена траектория движения полярного циклона, начальное (черный круг) и конечное положение его центра. Общее направление движения циклона — с запада на восток. Расстояние, пройденное циклоном, составило около 500 км, скорость его перемещения оставалась практически неизменной в течение всего периода существования и составила около 20 км/ч.

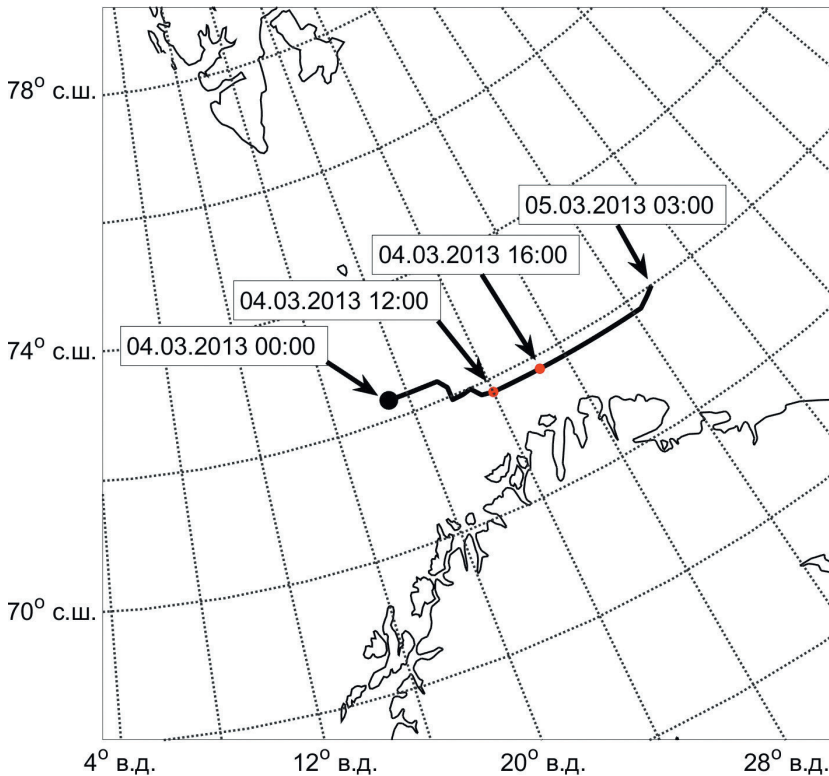


Рис. 1. Траектория движения полярного циклона.

Fig. 1. Track of the polar low.

Микроволновые скаттерометры ASCAT

Нами были использованы данные скаттерометров ASCAT, установленных на спутниках MetOp-A,B, которые находятся на солнечно-синхронной орбите. У каждого прибора имеется две полосы сканирования шириной 550 км, пространственное разрешение составляет $12,5 \times 12,5$ км [9]. Уровень обработки — L2. Период функционирования MetOp-A был с 19.10.2006 г. по 15.11.2021 г., а MetOp-B с 17.09.2012 г. — по настоящее время. Используемые переменные — скорость и направление ветра на высоте 10 м над водной поверхностью. Описанные переменные использовались в процессе ассимиляции данных. Для ассимиляции и последующего расчета ошибок время всех измерений округлялось до ближайшего часа (к 07:00, 08:00, 09:00 и т. д.). Всего за период численного эксперимента было ассимилировано 26 проходов спутника, в каждом из которых имелось 500—5000 наблюдений за скоростью и направлением ветра.

Атмосферный реанализ ERA5

Пространственное разрешение составляло $0,25^\circ \times 0,25^\circ$, временное разрешение — 1 час, покрытие — глобальное [10]. Данные реанализа использовались для определения начальных и граничных условий для модели WRF, а также при ассимиляции данных.

Атмосферная модель WRF

Для расчетов использовалась модель WRF, версия 4.4.2. Исходные данные и граничные условия для запуска модели задавались при помощи данных атмосферного реанализа ERA5. Частота задания граничных условий — 3 ч. Пространственное разрешение родительского домена 15×15 км, вложенный домен 3×3 км, метод расчета во вложенном домене — «two-way nested». Модель имела 42 вертикальных уровня с гибридной системой координат. Для параметризации атмосферных процессов использовались следующие схемы:

- Microphysics – WDM6 [11];
- Shortwave & longwave atmospheric radiation – RRTMG [12];
- Cumulus – Kain-Fritsh scheme [13] для 15 км, отключена для 3 км;
- Planetary Boundary Layer (PBL) – Mellor-Yamada-Janjic scheme [14];
- Surface layer – Monin-Obukhov scheme [15].

Также для обоих доменов использовался метод четырехмерной ассимиляции данных, который включал в себя ассимиляцию данных ERA5 (только выше PBL) и скаттерометров ASCAT.

Методология ассимиляции данных

В данной работе использовался метод четырехмерной ассимиляции данных (Four Dimensional Data Assimilation; FDDA), который также носит название релаксационных методов ассимиляции или метод наджинга. Релаксационные методы ассимиляции представляют собой аддитивный член в уравнении для той или иной переменной, вычисляемой в численной модели [15].

Представим общий вид уравнения для одной из переменных:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = F(\theta) + G_0 W_0 (\theta_0 - \theta), \quad (1)$$

где θ — результирующая величина переменной, $F(\theta)$ — полное выражение для вычисления величины переменной, G_0 — коэффициент силы наджинга, W_0 — весовой коэффициент наджинга, θ_0 — пространственно- и временно-интерполированная величина переменной по данным, которые ассимилируются.

Из уравнения (1) видно, что на результирующую величину переменной линейно влияет коэффициент силы наджинга, а также его весовой коэффициент. Коэффициент силы воздействия задается исследователем, весовой коэффициент вычисляется в модели и зависит от расстояния от точки, в которой производятся вычисления, до точки наблюдений ассимилируемых данных.

В данной модели существует разделение релаксационных методов ассимиляции на две составляющие. Первая из них — сеточный наджинг. Сеточный наджинг позволяет ассимилировать данные, которые являются входными для модели (т. е. из которых создаются граничные и начальные условия). Вторая составляющая — поверхностный наджинг. Поверхностный наджинг позволяет ассимилировать данные наблюдений, например температуры воздуха, влажности, скорости и направления ветра на метеорологической станции, в том числе данные о скорости и направлении ветра, полученные дистанционными методами.

Обычно сеточные методы релаксации используются для того, чтобы решение, получаемое по модели, не могло сильно удалиться от исходных данных, а величина коэффициента наджинга определяет, насколько сильно будет воздействие ассимилируемых данных на решение модели. Чем выше коэффициент, тем сильнее воздействие, тем ближе решение по модели WRF будет к ассимилируемым данным. В данном исследовании коэффициент сеточного наджинга составлял $G_0 = 0,0001$ 1/с, что можно характеризовать как слабый наджинг, поэтому наджинг использовался только выше уровня PBL.

Поверхностный наджинг обычно используется для того, чтобы ассимилировать различные метеорологические параметры. В данном случае были ассимилированы данные скаттерометров о скорости и направлении ветра на высоте 10 м над поверхностью океана. Коэффициент поверхностного наджинга составил $G_0 = 0,0003$ 1/с, что можно характеризовать как умеренный наджинг.

Описание численного эксперимента и запуск модели WRF

В данной работе исследовался один полярный циклон. Общая схема запуска модели может быть представлена в следующем порядке:

1. Определение даты начала и окончания расчета модели WRF. Дата начала расчета связана со временем начала циклона, от которого отнимается 12 часов. Дата окончания расчета равняется дате окончания циклона. Таким образом, период расчета составил 03.03.2013 15:00 UTC — 05.03.2013 03:00 UTC (36 ч).

2. Создание расчетной области (родительского домена) с разрешением 15×15 км и вложенной сетки с разрешением 3×3 км. Вложенная сетка полностью

покрывает область, где находился циклон за время своего существования. Размер этой области составил 1140×900 км, что позволило определять скорости ветра в циклоне в радиусе 300 км от центра циклона в каждый момент времени.

3. Определение начальных и граничных условий для обоих доменов (15 и 3 км) по данным атмосферного реанализа ERA5.

4. Ассимиляция данных реанализа и скаттерометров на всем периоде расчета WRF.

5. Запуск модели в заданном периоде времени.

Для того, чтобы определить степень влияния релаксационных методов ассимиляции на получаемые результаты, было произведено несколько запусков модели с различными условиями. Каждый запуск начинался и заканчивался в одно и то же время и длился 36 часов, с 03.03.2013 15:00 UTC по 05.03.2013 03:00 UTC, причем размер и конфигурация доменов сохранялась, начальные и граничные условия для всех трех запусков были получены из данных реанализа ERA5. При сеточном наджинге были ассимилированы компоненты скорости ветра, влажности и температуры, а при поверхностном только компоненты скорости ветра.

Первый численный эксперимент — контрольный. Для него использованы только данные ERA5 для создания начальных и граничных условий, частота задания граничных условий равняется 3 часа.

Второй эксперимент — с использованием сеточного наджинга. В процессе расчета выполнялась ассимиляция данных ERA5.

Третий эксперимент — с использованием сеточного и поверхностного наджинга. В процессе расчета производилась ассимиляция данных реанализа ERA5 и данных скаттерометров ASCAT.

Результаты

В данном разделе представлено сравнение скорости ветра в полярном циклоне по результатам трех численных экспериментов, а также скорости ветра по данным атмосферного реанализа ERA5 и скаттерометрам ASCAT.

Скорости ветра по данным скаттерометра

На рис. 2 дается распределение вектора скорости ветра в полярном циклоне по данным скаттерометров ASCAT в два момента времени. На изображениях центр циклона отмечен красной точкой. Видно, что максимальные скорости ветра достигают 23 м/с, а области высоких скоростей ветра находятся в тыловой части циклона в пределах 50 км от его центра. Во фронтальной части циклона наблюдаются зоны низких скоростей ветра, вплоть до 5 м/с и ниже.

Скорости ветра по данным ERA5

На рис. 3 показана конфигурация полей ветра по данным атмосферного реанализа. Видно, что поле скорости ветра имеет схожую конфигурацию с данными

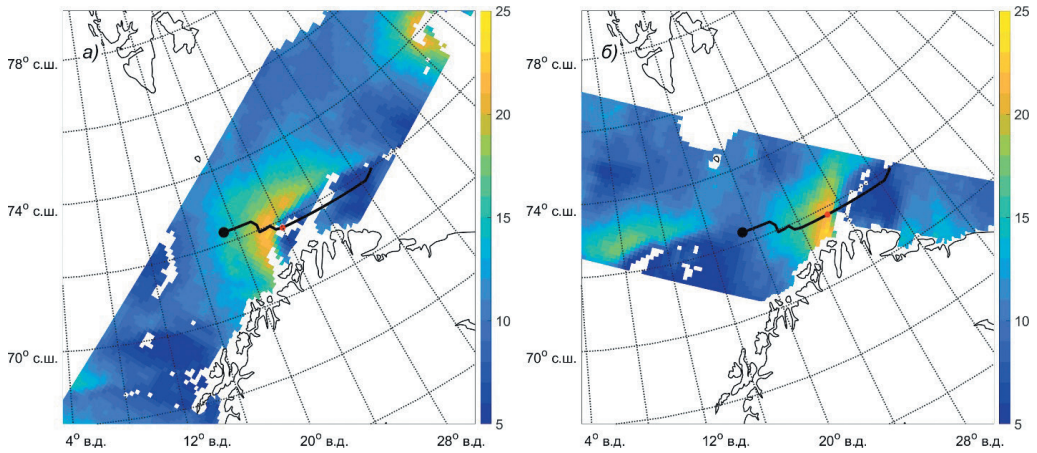


Рис. 2. Конфигурация поля скорости ветра на уровне 10 м в полярном циклоне по данным скаттерометра ASCAT.

a — 04.03.2013 12:00 UTC, *б* — 04.03.2013 16:00 UTC.

Fig. 2. ASCAT 10 m wind speed field configuration within the polar low.

a — 04.03.2013 12:00 UTC, *б* — 04.03.2013 16:00 UTC.

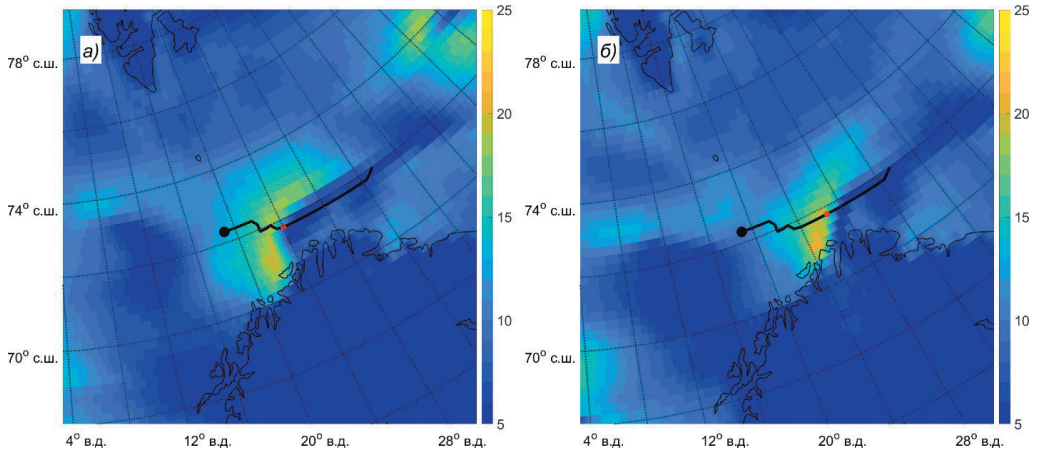


Рис. 3. Конфигурация поля скорости ветра на уровне 10 м в полярном циклоне по данным реанализа ERA5.

a — 04.03.2013 12:00 UTC, *б* — 04.03.2013 16:00 UTC.

Fig. 3. ERA5 10 m wind speed field configuration within the polar low.

a — 04.03.2013 12:00 UTC, *б* — 04.03.2013 16:00 UTC.

скаттерометров, высокие скорости ветра также находятся в тыловой части циклона, однако их максимальные значения меньше, чем по данным ASCAT, и достигают около 21 м/с.

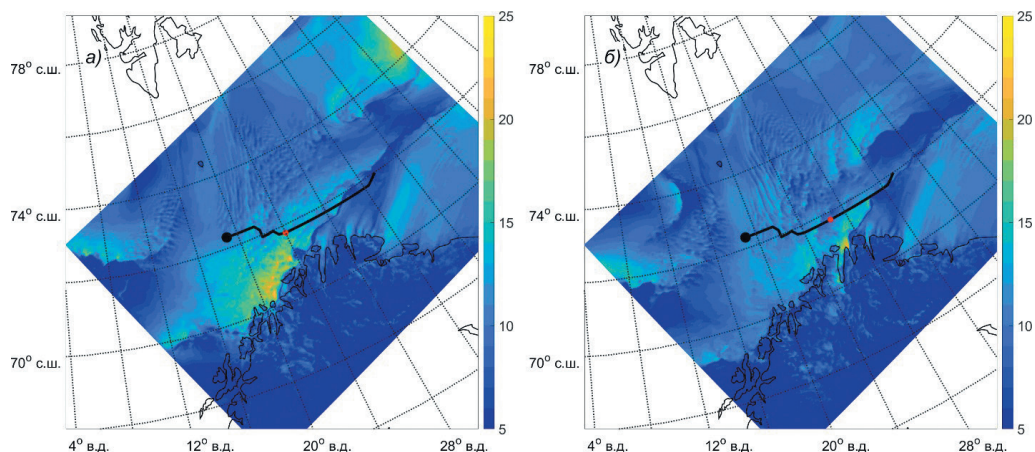


Рис. 4. Поле скорости ветра на уровне 10 м в полярном циклоне при контрольном эксперименте.

a — 04.03.2013 12:00 UTC, *б* — 04.03.2013 16:00 UTC.

Fig. 4. 10 m wind speed within the polar low for the control model run.

a — 04.03.2013 12:00 UTC, *б* — 04.03.2013 16:00 UTC.

Контрольный численный эксперимент

На рис. 4 показана конфигурация полей ветра по данным модели WRF при контрольном запуске, т. е. без ассимиляции каких-либо данных, в сетке с разрешением 3×3 км. Для момента времени 12:00 UTC видна область высоких скоростей ветра, она находится справа по ходу движения циклона на расстоянии от центра циклона свыше 100 км, а максимальные значения в ней достигают около 23 м/с. В момент времени 16:00 UTC поле скорости ветра не имеет ярко выраженной области высоких значений, величины максимальных скоростей едва превышают 16—17 м/с.

Второй модельный эксперимент с ассимиляцией данных ERA5

На рис. 5 показана конфигурация полей ветра по данным модели WRF при втором запуске, т. е. при ассимиляции данных ERA5 в сетке с разрешением 3×3 км. Области высоких скоростей ветра расположены в тыловой части циклона, максимальные скорости достигают около 20 м/с, конфигурация поля ветра близка к той, которую можно видеть на рис. 3, где показано поле ветра по ERA5.

Третий модельный эксперимент с ассимиляцией данных ERA5 и скаттерометров ASCAT

На рис. 6 показана конфигурация полей ветра по данным модели WRF при третьем запуске, т. е. при ассимиляции данных ERA5 и скаттерометров в сетке с разрешением 3×3 км. Максимальные скорости ветра в 12:00 UTC и 16:00 UTC

достигают около 23 м/с, области высоких скоростей ветра хорошо согласуются с данными ASCAT.

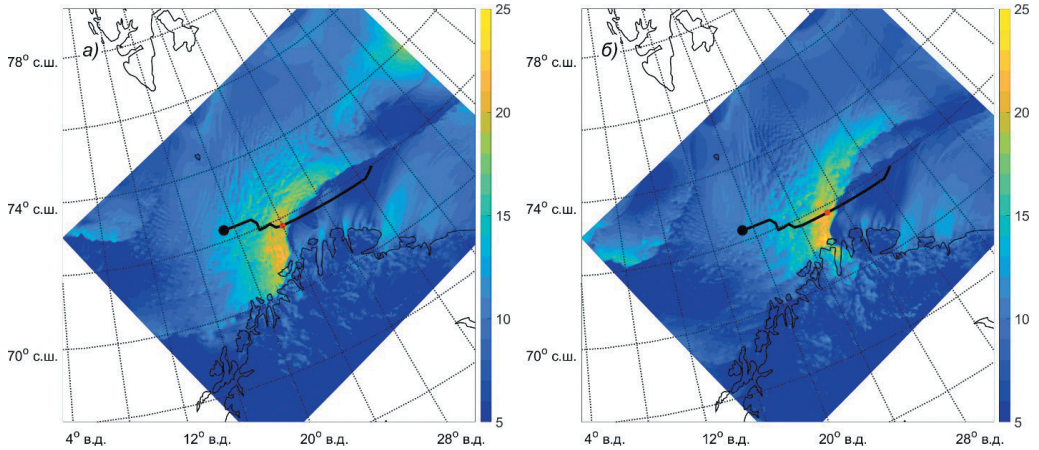


Рис. 5. Поле скорости ветра на уровне 10 м в полярном циклоне при втором модельном эксперименте.

a — 04.03.2013 12:00 UTC, *б* — 04.03.2013 16:00 UTC.

Fig. 5. 10 m wind speed within the polar low for the second model run.

a — 04.03.2013 12:00 UTC, *б* — 04.03.2013 16:00 UTC.

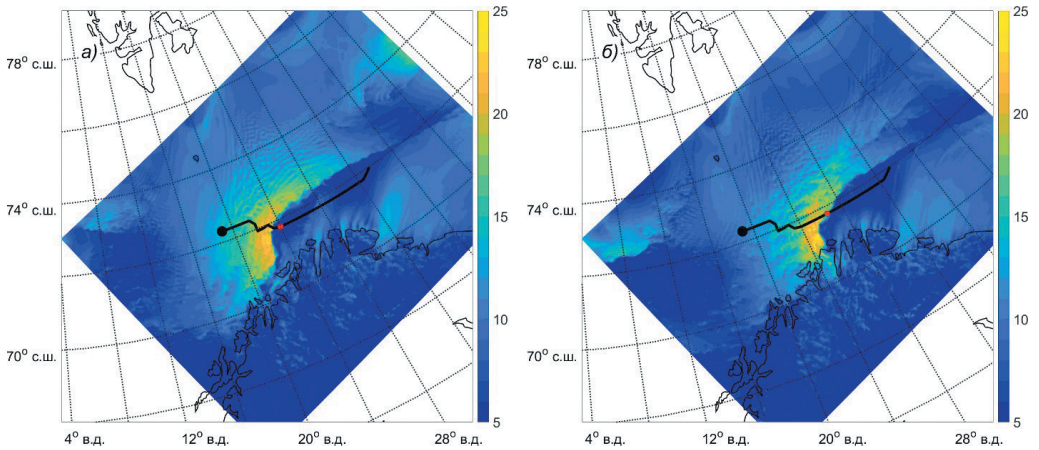


Рис. 6. Поле скорости ветра на уровне 10 м в полярном циклоне при третьем модельном эксперименте.

a — 04.03.2013 12:00 UTC, *б* — 04.03.2013 16:00 UTC.

Fig. 6. 10 m wind speed within the polar low for the third model run.

a — 04.03.2013 12:00 UTC, *б* — 04.03.2013 16:00 UTC.

Сравнивая между собой конфигурацию поля ветра, максимальные скорости ветра и их локализацию, во всех случаях (рис. 2—6) наблюдаются следующие закономерности:

- поле ветра по данным ERA5 имеет схожую структуру по сравнению с данными скаттерометров ASCAT;

- максимальные скорости ветра в ERA5 ниже (около 20 м/с), чем по данным ASCAT (24 м/с);

- конфигурация поля ветра в первом эксперименте сильно отличается от поля ветра по данным скаттерометров;

- максимальные скорости ветра в первом эксперименте ниже (20 м/с), чем по данным скаттерометров (24 м/с);

- для второго и третьего эксперимента поле ветра имеет схожую структуру с данными ASCAT;

- максимальные скорости ветра для третьего эксперимента достигают 23—25 м/с, что наиболее близко к максимальным скоростям ветра по данным ASCAT и показывает высокую степень усвоения данных.

Для оценки величины отклонения скорости ветра от данных скаттерометров была рассчитана среднеквадратическая ошибка (RMSE), формула (2):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum (y_m - y_a)^2}, \quad (2)$$

где n — количество наблюдений, y_m — скорость ветра по данным численного эксперимента или реанализа, y_a — скорость ветра по данным скаттерометров. Таким образом, была рассчитана ошибка для трех численных экспериментов и для реанализа ERA5.

На рис. 7 показано распределение ошибки в течение периода существования циклона для всего вложенного домена. Как видно, для первого эксперимента ошибка в течение всего периода существования циклона находится в диапазоне 2,5—3,5 м/с, для второго и третьего эксперимента ошибка находится в диапазоне 1,5—2,5 м/с, однако для третьего эксперимента средняя ошибка ниже (2,0 м/с), чем для второго (2,15 м/с). Наименьшая ошибка наблюдается по данным ERA5, она находится в диапазоне 1,25—2,50 м/с, её средняя величина составляет 1,7 м/с. Таким образом, общая величина ошибки (для всего рассматриваемого региона) по модельным результатам находится приблизительно на одном уровне с данными реанализов, но при этом высокие значения скорости ветра в циклонах существенно ближе к данным спутниковых скаттерометров.

Кроме того, для данных скоростей ветра была построена диаграмма Тейлора (рис. 8). Хорошо видно, что каждый последующий эксперимент улучшал общую оценку скорости ветра относительно данных скаттерометров, при этом наилучшая оценка наблюдается по реанализу. Это можно объяснить тем, что данные реанализа и скаттерометра более «гладкие» по сравнению с результатами моделирования, имеющими существенно более высокое пространственное разрешение, а также погрешностью, вызванной округлением времени измерений ASCAT до целого часа при ассимиляции данных. При рассмотрении же максимальных скоростей

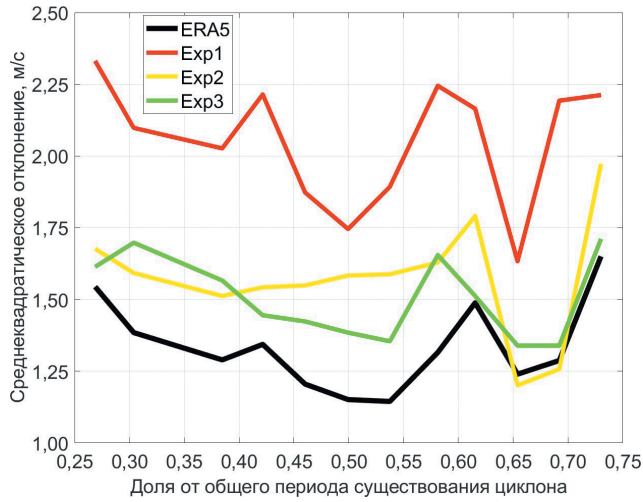


Рис. 7. Оценки среднеквадратической ошибки (RMSE) для трех численных экспериментов (Exp1, Exp2, Exp3) и реанализа ERA5 (минимальное количество наблюдений скорости ветра $n \geq 300$).

Fig. 7. Root mean square error (RMSE) for the three numeric data experiments (Exp1, Exp2, Exp3) and ERA5 reanalysis (minimal quantity of wind speed observations $n \geq 300$).

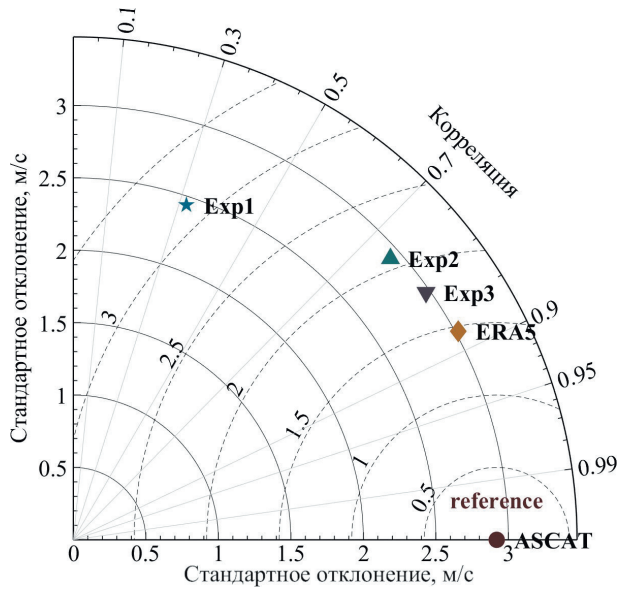


Рис.8. Диаграмма Тейлора для трех численных экспериментов и реанализа ERA5 относительно данных ASCAT.

Fig. 8. Taylor's diagram for three numerical experiments and ERA5 reanalysis against ASCAT data.

ветра в циклоне в различные моменты времени наилучшие оценки наблюдаются при третьем и втором экспериментах, а наихудшие по данным реанализа и при первом эксперименте (табл. 1).

Таблица 1

Максимальные скорости ветра в полярном циклоне в разные моменты времени (м/с)
Maximum wind speeds within the analyzed polar low at different times (m/s)

Дата и время	ASCAT	ERA5	Exp1	Exp2	Exp3
04.03.2013 08:00	19,7	19,0	21,8	21,0	19,8
04.03.2013 09:00	21,0	19,6	21,2	19,4	21,1
04.03.2013 12:00	22,1	19,7	21,6	21,9	22,9
04.03.2013 16:00	22,7	20,4	20,8	23,9	23,8

Примечание. Жирным шрифтом выделены значения, наиболее близкие к данным ASCAT.

Заключение

В результате трех численных экспериментов было рассчитано поле скорости ветра для полярного циклона в акватории Норвежского и Баренцева морей. Было показано, что релаксационные методы ассимиляции позволяют улучшить оценку максимальных скоростей ветра, а также получить конфигурации полей ветра, которые хорошо согласуются с данными скаттерометров ASCAT.

Так, для первого эксперимента области высоких значений скорости ветра локализованы справа по ходу движения циклона на расстоянии свыше 100 км от центра, в то время как по данным скаттерометров эти области расположены в тыловой части циклона на расстоянии до 50 км от центра. Сама область высоких значений скорости ветра в первом эксперименте сильно отличается от поля ветра по данным скаттерометров.

Во втором и третьем экспериментах конфигурации поля ветра имеют большое сходство с восстановленными по данным скаттерометра ASCAT. Максимальные скорости ветра в третьем эксперименте (23—25 м/с) ближе к данным ASCAT (24 м/с), чем во втором (21 м/с).

Величина ошибки RMSE для каждого последующего эксперимента снижается, а ошибка по ERA5 имеет наименьшую величину, однако максимальные скорости ветра хуже соотносятся с данными ASCAT, чем для второго и третьего эксперимента.

Следует также отметить, что у модели WRF имеется преимущество в разрешающей способности, которая превосходит реанализ в несколько раз. Так, на широте 70° с.ш. разрешающая способность реанализа составляет около 25×10 км, в то время как разрешение вложенного домена WRF в данной работе составляет 3×3 км. Таким образом, можно с большей точностью определять локализацию области максимального ветра в циклоне.

Максимальные скорости ветра в рассматриваемом случае не превышали 25 м/с. При таких условиях данные ASCAT находятся в хорошем соответствии с данными буйковых станций, хотя и наблюдается небольшое занижение значений

при скоростях более 15 м/с [17]. Для целей данной работы полагаем это занижение несущественным по сравнению с получаемым с их использованием повышением качества полей ветра относительно данных реанализа. При анализе более интенсивных циклонов со скоростями ветра, превышающими 25 м/с, занижение будет более выражено и может потребоваться применение коррекции данных ASCAT (напр., [17]) или использование других доступных данных.

Несмотря на то, что численные эксперименты были проведены только для одного полярного циклона, устойчивое снижение ошибки позволяет предположить высокий потенциал использования четырехмерной ассимиляции данных (FDDA) и для других подобных случаев. Кроме того, применение данного метода ассимиляции данных возможно и при прогнозе формирования и развития полярных циклонов для получения более точных оценок опасности, которую они могут представлять.

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. 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.
3. Stoll P., Graverson 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.
4. Kudryavtsev V., Cheshm Siyahi V., Yurovskaya M., Chapron B. On surface waves in arctic seas. *Boundary-Layer Meteorology*. 2023; 187(1): 267—294. doi: 10.1007/s10546-022-00768-9.
5. 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.
6. Belmonte Rivas M., Stoffelen A. Characterizing ERA-Interim and ERA5 surface wind biases using ASCAT. *Ocean Science*. 2019; 15(3): 831—852. doi: 10.5194/os-15-831-2019.
7. Potisomporn P., Adcock T. A. A., Vogel C. R. Evaluating ERA5 reanalysis predictions of low wind speed events around the UK. *Energy Reports*. 2023; (10): 4781—4790. doi: 10.1016/j.egy.2023.11.035.
8. Campos R., Gramscianinov C., de Camargo R. et al. Assessment and calibration of ERA5 severe winds in the atlantic ocean using satellite data. *Remote Sensing*. 2022; 14(19): 4918. doi: 10.3390/rs14194918.
9. Verhoef A., Vogelzang J., Stoffelen A. ASCAT L2 winds data record validation report. *Ocean and Sea Ice SAF Technical Note*, Royal Netherlands Meteorological Institute, De Bilt, Netherlands. 2016. doi: 10.15770/EUM_SAF_OSI_0006.
10. 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.
11. Lim K. S. S., Hong S. Y. Development of an effective double-moment cloud microphysics scheme with prognostic cloud condensation nuclei (CCN) for weather and climate models. *Monthly Weather Review*. 2010; 138(5): 1587—1612. doi: 10.1175/2009MWR2968.1.
12. Iacono M. J. Radiative forcing by long-lived greenhouse gases: Calculations with the AER radiative transfer models. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2008; 113(D13). doi: 10.1029/2008JD009944.
13. Kain J. S. The Kain–Fritsch convective parameterization: an update. *Journal of Applied Meteorology*. 2004; 43(1): 170—181. doi: 10.1175/1520-0450(2004)043<0170:TKCPAU>2.0.CO;2.
14. Mellor G. L., Yamada T. Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems. *Reviews of Geophysics*. 1982; 20(4): 851—875. doi: 10.1029/RG020i004p00851.

15. Monin A. S., Obukhov A. M. Basic laws of turbulent mixing in the surface layer of the atmosphere. *Contrib. Geophys. Inst. Acad. Sci. USSR*. 1954; 151(163): e187.
16. Skamarock C., Klemp J., Dudhia J. et al. A description of the advanced research WRF version 4. *NCAR tech. note*. 2019; (145). doi: 10.5065/1dfh-6p97.
17. Polverari F., Portabella M., Lin W. et al. On high and extreme wind calibration using ASCAT. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2021; (60): 1—10. doi: 10.1109/TGRS.2021.3079898.

Информация об авторах

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

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

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

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

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

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

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 14.12.2023

Принята в печать после доработки 30.08.2024

The article was received on 14.12.2023

The article was accepted after revision on 30.08.2024