

ОЦЕНКА ДОЛИ ПОЛЯРНЫХ ЦИКЛОНОВ, ВОСПРОИЗВОДИМЫХ АТМОСФЕРНЫМИ РЕАНАЛИЗАМИ, С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАЗЛИЧНЫХ НАБОРОВ ДАННЫХ

Ю.Е. СМЕРНОВА, П.А. ГОЛУБКИН

*Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург,
e-mail: Julliet_and@mail.ru*

Впервые проведены оценки степени воспроизведения полярных циклонов в реанализе Arctic System Reanalysis (ASR), специально разработанном для арктического региона, а также проведено сравнение с оценками, полученными с использованием реанализа ERA-Interim. Установлено, что по данным реанализов ERA-Interim и ASR воспроизводится, соответственно, 48 и 89 % случаев из широко используемого списка полярных циклонов. Доля полярных циклонов, воспроизводимых реанализом ASR, таким образом, оказалась значительно выше оценок, полученных в предшествующих исследованиях для других реанализов. Показано, что значения скорости приводного ветра по данным реанализа ASR находятся в хорошем соответствии с данными спутниковых измерений, в то время как значения реанализа ERA-Interim значительно занижены. Установлено, что выбор альтернативного списка полярных циклонов ведет к существенно иным результатам. Как обнаружено, при использовании более полного списка полярных циклонов доля случаев, воспроизводимых реанализами ERA-Interim и ASR, уменьшилась до 26 и 66 % соответственно. Также было обнаружено влияние критерия статической устойчивости атмосферы на получаемые результаты.

Ключевые слова: полярные циклоны, атмосферный реанализ, ASR, ERA-Interim, относительная завихренность, скорость приводного ветра.

ВВЕДЕНИЕ

Полярные циклоны являются подклассом мезомасштабных циклонов, характеризующимся высокими скоростями приводного ветра (вплоть до штормовых значений или даже выше). Данные погодные системы, наблюдающиеся в обоих полушариях, формируются к полюсу от основной бароклинной зоны и ассоциируются с холодными вторжениями (Rasmussen, Turner, 2003). Их короткое время жизни (менее 48 ч) и небольшой пространственный размер (до 1000 км) в совокупности с недостаточным покрытием контактными измерениями районов их генерации приводят к тому, что полярные циклоны редко идентифицируются на синоптических картах. Ранее это могло привести к полной неосведомленности рыбаков и мореплавателей, а также жителей прибрежных районов о надвигающейся угрозе, вызванной полярными циклонами, которая включает в себя обледенение, высокие волны, сильные ветры и обильные снегопады. При создании первой климатологии полярных циклонов в Норвежском море (Wilhemsen, 1985) наряду с синоптическими картами и небольшим количеством спутниковых инфракрасных снимков Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) использовались даже отчеты о кораблекрушениях. Последующие климатологии, регионом исследования

которых в основном являлся Северо-Европейский бассейн (Норвежское, Баренцево и Гренландское моря), преимущественно основывались на спутниковых данных, доступность которых увеличивалась со временем (Blechschmidt, 2008; Луценко, Лагун, 2010; Noer et al., 2011; Smirnova et al., 2015, Смирнова и др., 2016), или же на численных моделях, способность которых воспроизводить полярные циклоны с использованием данных атмосферных реанализов в качестве начальных условий также улучшалась с течением времени (напр., Bracegirdle, Gray, 2008; Zahn, von Storch, 2008).

Однако степень воспроизведения полярных циклонов самими атмосферными реанализами также представляет интерес в настоящее время. В недавней работе (Laffineur et al., 2014) в результате анализа списка, содержащего 29 полярных циклонов за три сезона (1999/2000–2001/02), было установлено, что только 24 и 45 % из них идентифицируются в полях приведенного к уровню моря атмосферного давления по данным реанализов ERA-40 и ERA-Interim соответственно. Затем данные реанализов были использованы в качестве входных параметров для мезомасштабной модели Méso-NH, имеющей более высокое пространственное разрешение (12 км). Это позволило выявить при моделировании больше случаев, и в результате доля воспроизводимых полярных циклонов улучшилась и стала равна 61 % по данным ERA-40 и 79 % по данным ERA-Interim. В схожей работе (Zappa et al., 2014) для оценки воспроизведения полярных циклонов по данным реанализов использовался автоматический алгоритм отслеживания циклонов по трем параметрам: интенсивность относительной завихренности на уровне 850 гПа, скорость приводного ветра и критерий статической устойчивости атмосферы. При рассмотрении списка, содержащего 34 случая за сезоны 2008/09–2010/11, было обнаружено, что около 55 и 70 % полярных циклонов воспроизводится по данным реанализа ERA-Interim и оперативного анализа ECMWF соответственно. Примечательным является то, что с использованием автоматического алгоритма отслеживания дополнительно было найдено 49 случаев полярных циклонов, отсутствующих в анализируемом списке.

Таким образом, степень воспроизведения полярных циклонов по данным реанализов остается недостаточной. В то же время в последние годы был достигнут значительный прогресс, связанный с повышением качества атмосферных реанализов, включающий в себя увеличение горизонтального и вертикального разрешений, усовершенствования физических схем и методов ассимиляции данных. Исходя из этого, с появлением реанализа Arctic Systems Reanalysis (ASR), преимущества которого при воспроизведении других мезомасштабных явлений уже были продемонстрированы (Moore et al., 2015), следует ожидать дальнейших улучшений, касающихся и воспроизведения полярных циклонов.

Следует отметить, что на существующие оценки степени воспроизведения полярных циклонов реанализами может влиять и ограниченность списков полярных циклонов, используемых для получения этих оценок. Так, в работах (Laffineur et al., 2014; Zappa et al., 2014), использовались списки из климатологии полярных циклонов, описанной в работе (Noer et al., 2011), для создания которой при отборе случаев применялись строгие дополнительные критерии, а также, например, в случаях образования ансамбля полярных циклонов в результате одного холодного вторжения в климатологию включался лишь один наиболее интенсивный циклон. В результате данная климатология содержит значительно меньшее количество полярных циклонов (около 12 в год) по сравнению с другими исследованиями. В связи с этим недавно

созданная климатология полярных циклонов (Smirnova et al., 2015), отбор случаев для которой осуществлялся на основе широко используемого компромиссного определения полярных циклонов, предложенного в работе (Rasmussen, Turner, 2003), предоставляет отличный альтернативный список полярных циклонов, в котором содержится в среднем 45,5 случаев в год.

В данной работе сравнивается степень воспроизведения полярных циклонов двумя реанализами (ASR и ERA-Interim) с использованием двух списков полярных циклонов с целью оценки возможностей нового реанализа и установления возможных расхождений при использовании различных списков.

ДАННЫЕ И МЕТОДЫ

Данные реанализов

ERA-Interim является глобальным атмосферным реанализом Европейского центра среднесрочных прогнозов (ECMWF), данные которого доступны с 1979 г. по настоящий момент. Он основан на интегрированной системе прогнозирования (IFS) с изменениями цикла 31r2. Для системы ассимиляции данных используется 4D вариационный анализ с 12-часовыми циклами. Анализ выполнен на 60 вертикальных уровнях со спектральным разрешением T255 (соответствует горизонтальному разрешению ~79 км). Данные доступны каждые 6 ч на регулярной сетке $0,75 \times 0,75^\circ$. Более подробная информация о реанализе ERA-Interim представлена в работе (Dee et al., 2011).

Реанализ ASR создается группой полярной метеорологии Университета штата Огайо. В данном исследовании использовалась первая версия реанализа с горизонтальным разрешением 30 км (в данной работе будет обозначаться как ASR). ASR был создан с использованием модели Polar Weather Research and Forecasting (Polar WRF) версии 3.3.1 (Hines, Bromwich, 2008; Bromwich et al., 2009). Данные доступны с дискретностью 3 ч с 2000 по 2012 гг. Более подробная информация о реанализе ASR представлена в работе (Bromwich et al., 2016).

Списки полярных циклонов

В работе (Noer et al., 2011;)* представлена климатология, основанная преимущественно на визуальном анализе инфракрасных снимков, полученных спутниковым радиометром AVHRR. Несмотря на то, что в работе привлекались и скаттерометрические данные, критерий скорости приводного ветра не всегда учитывался при отборе полярных циклонов из класса мезомасштабных систем. Вместо этого требовалось, чтобы результаты моделирования с использованием модели HIRLAM отображали благоприятные для развития полярных циклонов метеорологические условия. В тех случаях, когда группа полярных циклонов формировалась в общих синоптических условиях, в климатологию включался лишь самый интенсивный циклон из группы. В целом в работе содержится 121 полярный циклон за 10 лет (2000–2009 гг.).

Климатология полярных циклонов, представленная в работе (Smirnova et al., 2015)**, основывается на анализе данных спутникового микроволнового радиометра Special Sensor Microwave Imager (SSM/I). Первоначально при создании данной климатологии по полям интегрального содержания водяного пара в атмосфере, восстановленным по измеренным радиояркостным температурам с использованием алгоритма, настроенного для арктических условий (Bobylev et al., 2010), отбирались

*Далее по тексту — N11.

** Далее по тексту — S15.

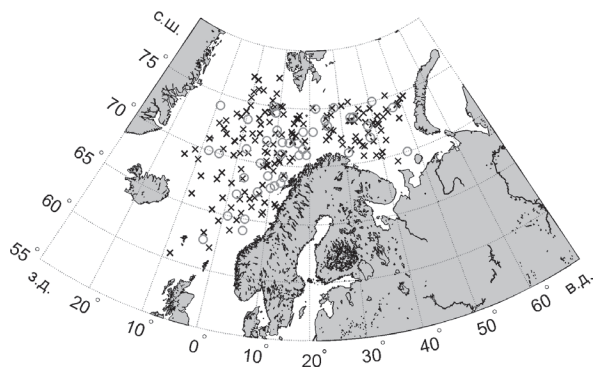


Рис. 1. Пространственное распределение рассматриваемых полярных циклонов. Серыми кружками обозначены полярные циклоны из списка по климатологии N11 (46 случаев). Черными крестиками обозначены полярные циклоны из списка по климатологии S15 (158 случаев).

мезомасштабные циклонические вихревые образования, размером не превышающие 1000 км и существующие менее 48 ч. Далее применялся критерий скорости приводного ветра, значения которого в отобранных случаях должны были превышать 15 м/с. Данные критерии соответствуют широко используемому компромиссному определению, предложенному в (Rasmussen, Turner, 2003). В работе содержится 637 полярных циклонов за 14 сезонов (1995/96—2008/09 гг.).

В данном исследовании используются два списка полярных циклонов из двух описанных выше климатологий (N11, S15) за четыре зимних сезона (т.е. с сентября по апрель) с 2000/01 по 2003/04 гг. Количество полярных циклонов в списках из N11 и S15 составляет 46 и 158 соответственно (рис. 1).

Метод и критерии идентификации полярных циклонов

Воспроизведение полярных циклонов из двух списков оценивалось с использованием набора критериев. В качестве первого критерия применялся критерий интенсивности относительной завихренности на уровне 850 гПа. Предварительно была проведена спектральная фильтрация полей относительной завихренности с помощью описанной далее методологии. Исходные поля относительной завихренности раскладываются с помощью спектральных коэффициентов Ψ_n^m и сферических гармоник $P_n^m(\mu)e^{im\lambda}$:

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

где $\psi(\lambda, \mu)$ — исходное поле; λ — долгота; $\mu = \sin\varphi$, где φ — широта; n и m — степень и порядок сферических функций; P_n^m — присоединенный полином Лежандра:

$$P_n^m(x) = (-1)^m (1-x^2)^{m/2} \frac{d^m}{dx^m} (P_n(x)),$$

где P_n — полином Лежандра:

$$P_n(x) = \frac{1}{2^n n!} \frac{d^n}{dx^n} [(x^2 - 1)^n];$$

Ψ_n^m — спектральные коэффициенты, которые находятся, как:

$$\Psi_n^m = \int_{-1}^1 \left\{ \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \Psi(\lambda, \mu) e^{-im\lambda} d\lambda \right\} P_n^m(\mu) d\mu,$$

где внутренний интеграл,

$$\Psi^m(\mu) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \Psi(\lambda, \mu) e^{-im\lambda} d\lambda,$$

является прямым преобразованием Фурье в зональном направлении. Прямое преобразование Фурье рассчитывается на каждом круге широты, с использованием быстрого преобразования Фурье. Внешний интеграл,

$$\Psi_n^m = \int_{-1}^1 \{\Psi^m(\mu)\} P_n^m(\mu) d\mu,$$

оценивается в меридиональном направлении с помощью Гауссовой квадратуры:

$$\Psi_n^m = \sum_{j=1}^J \Psi^m(\mu_j) P_n^m(\mu_j) w_j,$$

где μ_j соответствует Гауссовым узлам сетки в меридиональном направлении, w_j — соответствующий Гауссов вес в точке μ_j :

$$w_j = \frac{2(1-\mu_j^2)}{[JP_{J-1}(\mu_j)]^2}, \quad \sum_{j=1}^J w_j = 2,$$

где J — количество Гауссовых узлов сетки в меридиональном направлении.

Поля относительной завихренности были синтезированы, исключая спектральные коэффициенты с общим волновым числом (степенью сферических функций) менее 40 и более 100. Таким образом, была выполнена фильтрация полей со спектральным разрешением T40–T100 (на плоскости это разрешение приблизительно характеризуется половиной длины наиболее короткой воспроизводимой волны в зональном направлении на экваторе, т.е. соответствует пространственной фильтрации около 200–500 км), что позволило отфильтровать атмосферные образования синоптического масштаба и мелкомасштабный «шум» для отображения исключительно мезомасштабных систем. Возможные колебания Гиббса, вызванные данной процедурой, были ослаблены путем применения спектрального коэффициента сглаживания, описанного в работе (Sardeshmukh, Hoskins, 1984, уравнение 9). Критерий относительной завихренности на уровне 850 гПа в отфильтрованном поле T40–T100 для полярных циклонов был установлен на уровне $6 \times 10^{-5} \text{ с}^{-1}$. По определению, предложенному в работе (Rasmussen, Turner, 2003), полярные циклоны развивают скорость приводного ветра вплоть до штормовых значений или даже выше. Данный факт обуславливает необходимость второго критерия, а именно скорости приводного ветра, которая должна быть более 15 м/с. Также был введен критерий статической устойчивости атмосферы, который является индикатором холодных вторжений и часто используется в исследованиях, связанных с воспроизведением полярных циклонов в реанализах (напр., Zahn, von Storch, 2008; Zappa et al., 2014; Yanase et al., 2016). В соответствии с этим разница между температурой поверхности океана и температурой воздуха на уровне 500 гПа (ТПО–Т500) должна быть больше, чем 43 К. В работе (Terpstra et al., 2016) отмечено, что использование данного критерия потенциально может исключать полярные циклоны, образовавшиеся в условиях «прямого сдвига» (англ. *forward shear*),

при которых средние направления переноса в нижнем и среднем слоях тропосферы и термического ветра совпадают, поскольку такие полярные циклоны могут иметь значения ТПО-Т500 менее 43 К. Несмотря на это, критерий атмосферной устойчивости используется в данной работе для того, чтобы сделать возможным прямое сравнение с предыдущими исследованиями, однако также оценивается влияние уменьшения порогового значения этого критерия на получаемые результаты. В целом, в данном исследовании используются те же критерии, что и в работе (Zappa et al., 2014), что позволяет проводить прямое сравнение результатов.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты, полученные в ходе работы, обобщены в таблице 1.

Таблица 1

Количество и доля полярных циклонов из списков из N11 (46 случаев) и S15 (158 случаев), в которых выполнены критерии, указанные в первом столбце, по данным реанализов ERA-Interim (ERA-I) и ASR

Установленные критерии для воспроизведения полярных циклонов в реанализах	N11 (46)				S15 (158)			
	ERA-I		ASR		ERA-I		ASR	
Относительная завихренность на уровне 850 гПа	27	57,8 %	43	93,5 %	79	50,0 %	136	86,1 %
Скорость ветра	31	67,4 %	44	95,7 %	65	41,1 %	146	92,4 %
ТПО-Т500	45	97,8 %	45	97,8 %	131	82,9 %	132	83,6 %
Относительная завихренность на уровне 850 гПа + скорость ветра	23	50,0 %	43	93,5 %	50	31,7 %	126	79,8 %
Все три критерия	22	47,8 %	41	89,1 %	41	26,0 %	104	65,8 %

На первом этапе рассматривались данные реанализа ERA-Interim, в которых, с использованием описанных выше критериев, осуществлялся поиск полярных циклонов по списку из N11. Значения фильтрованной относительной завихренности на уровне 850 гПа, превышающие $6 \times 10^{-5} \text{ c}^{-1}$, были найдены в 27 случаях. Критерий скорости приводного ветра ($\geq 15 \text{ м/с}$) оказался выполнен в 31 случае. Критерий разницы температур, являющийся индикатором устойчивости атмосферы, превысил установленный порог в 43 К во всех случаях, кроме одного. В результате применения всех трех критериев установлено, что реанализом ERA-Interim воспроизводится 48 % полярных циклонов из списка из климатологии N11. Данный результат согласуется с оценками, полученными в работах (Zappa et al., 2014) и (Laffineur et al., 2014), в которых также использовался список из климатологии N11, однако за меньший временной период. В результате использования списка из климатологии S15 обнаружено, что доля воспроизводимых реанализом ERA-Interim полярных циклонов значительно ниже. Из 158 полярных циклонов, входящих в список, только в 79 случаях выполнен критерий относительной завихренности, в 65 случаях скорость приводного ветра превысила 15 м/с, а разница температур ТПО-Т500 больше 43 К была отображена в 131 случае. В целом степень воспроизведения полярных циклонов из списка из S15 по данным реанализа ERA-Interim составила 26 % (41 из 158 случаев).

Аналогичным образом оценивалась степень воспроизведения полярных циклонов по данным реанализа ASR по списку из климатологии N11. Во многих случаях было отмечено существенное увеличение значений относительной завихренности

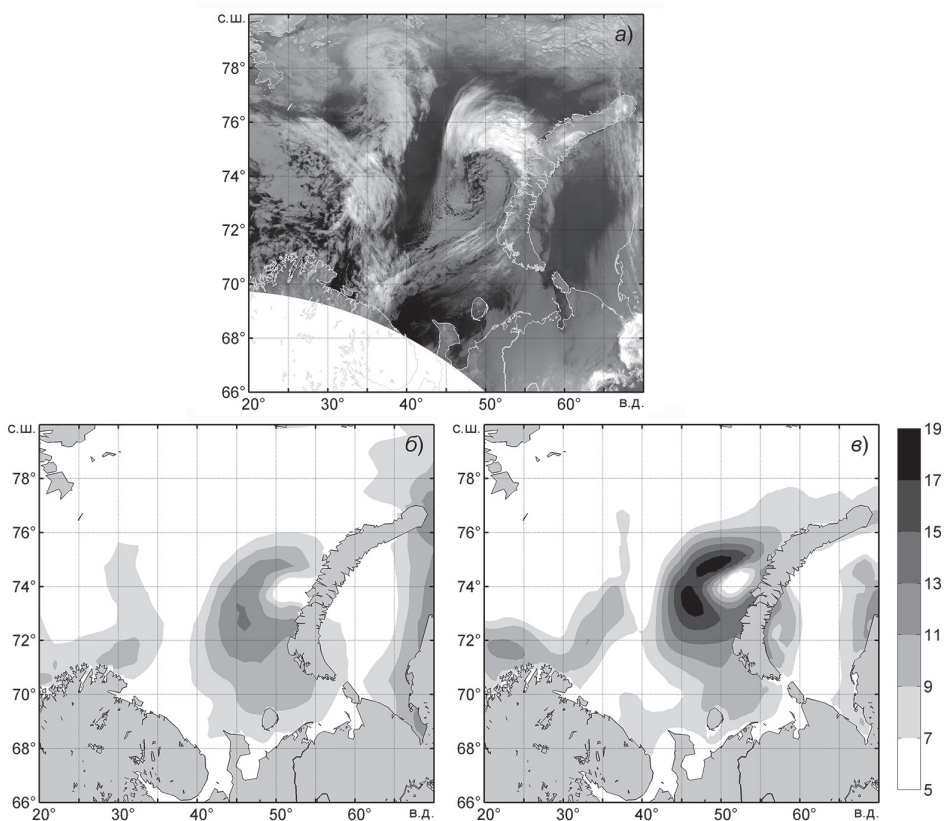


Рис. 2. Полярный циклон 2 ноября 2002 г. над акваторией Баренцева моря: ИК-изображение, полученное спектро радиометром MODIS в 09:10 UTC (а); поле скорости приповерхностного ветра (м/с) в 12:00 UTC по данным ERA-Interim (б) и ASR (в).

на уровне 850 гПа, что привело к тому, что этот критерий выполнен в 93,5 % случаев. Также по данным реанализа ASR было отмечено значительно улучшенное воспроизведение высокой скорости приводного ветра, характерной для полярных циклонов. Количество случаев со скоростью ветра более 15 м/с оказалось почти в полтора раза больше, чем по данным ERA-Interim. Пример, наглядно демонстрирующий преимущества реанализа ASR по сравнению с реанализом ERA-Interim, приведен на рис. 2, который иллюстрирует типичный случай, когда ASR, в отличие от ERA-Interim, воспроизводит высокие значения скорости приводного ветра в полярном циклоне.

Именно благодаря улучшенному воспроизведению скорости приводного ветра и относительной завихренности, по данным реанализа ASR воспроизводится приблизительно в два раза больше полярных циклонов, чем по данным ERA-Interim. В процентном соотношении доля воспроизводимых ASR полярных циклонов соответствует 89,1 %. Изменений параметра ТПО-Т500 при сравнении реанализов найдено не было, и отсутствие атмосферной неустойчивости, на которое в одном случае указывают данные реанализа ERA-Interim, остается без изменений и по данным реанализа ASR. Недавние исследования, в которых также использовались списки по-

лярных циклонов из N11, но за более короткий временной период, свидетельствуют, что наилучшим образом полярные циклоны воспроизводятся в оперативном анализе ECMWF (воспроизведение полярных циклонов составило 70 % по данным работы (Zappa et al., 2014)) и при привлечении мезомасштабной модели с использованием в качестве входных параметров данных реанализа ERA-Interim (в данном случае воспроизводится 79 % полярных циклонов, как показано в работе (Laffineur et al., 2014)). Таким образом, установлено, что способность реанализа ASR воспроизводить полярные циклоны существенно выше наилучших результатов других реанализов, о которых сообщалось в предыдущих работах.

Увеличение значений относительной завихренности на уровне 850 гПа и скорости приводного ветра в наблюдаемых полярных циклонах в реанализе ASR еще более ярко выражено при использовании списка полярных циклонов из климатологии S15. По сравнению с реанализом ERA-Interim, в ASR обнаружено на 57 случаев больше, когда выполняется критерий относительной завихренности, и на 81 случай больше, когда наблюдается превышение порогового значения скорости приводного ветра. При анализе полей разницы температур ТПО-Т500 выявлен лишь один случай, где только по данным ASR превышено пороговое значение 43 К. Итого в 104 из 158 полярных циклонов выполняются все три критерия, т.е. приблизительно в 66 % случаев. Эта доля в 2,5 раза больше, чем полученная по данным реанализа ERA-Interim, хотя и значительно меньше, чем при использовании списка из климатологии N11.

Также была проведена оценка и сравнение максимальных значений скорости приводного ветра, развиваемой в полярных циклонах, по данным двух реанализов с измерениями спутникового микроволнового радиометра SSM/I для соответствующих случаев (рис. 3). На рис. 3 также представлены статистические параметры для обоих реанализов: MAE — средняя абсолютная ошибка, RMSE — среднеквадратичная ошибка, R — коэффициент корреляции, а также наклон линии тренда. Как следует из рис. 3, максимальные значения скорости приводного ветра в полярных циклонах по данным реанализа ASR находятся в хорошем соответствии со спутниковыми измерениями, в то время как значения реанализа ERA-Interim в большинстве случаев

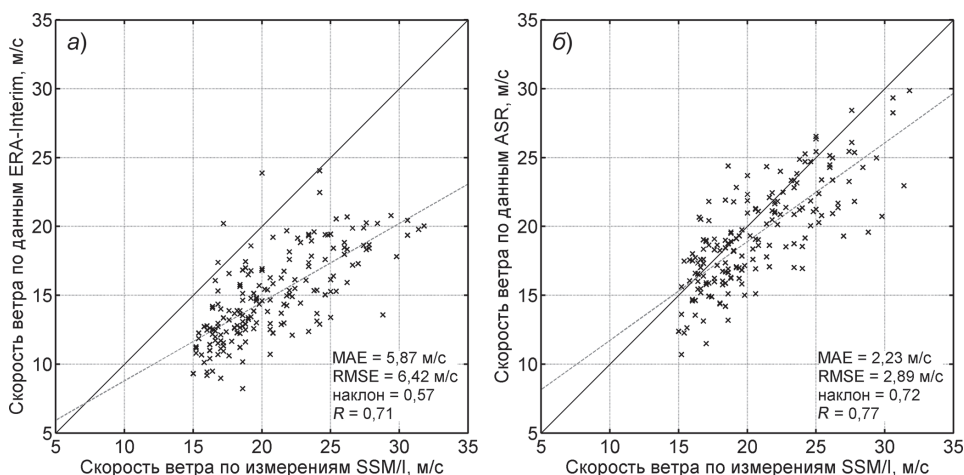


Рис. 3. Сравнение максимальных значений скорости приводного ветра в полярных циклонах по данным измерений спутникового микроволнового радиометра SSM/I и по данным реанализов ERA-Interim (а) и ASR (б).

занижены по сравнению как со значениями реанализа ASR, так и со спутниковыми измерениями радиометра SSM/I.

При сравнении двух реанализов не было найдено значительных расхождений в разнице температур ТПО-Т500. Это может быть вызвано тем, что данные ТПО реанализа ERA-Interim ассимилируются реанализом ASR (Bromwich et al., 2016), а также тем, что полям температуры воздуха на уровне 500 гПа не характерны значительные вариации на масштабах меньше тех, которые способен воспроизвести реанализ ERA-Interim. Что касается влияния этого критерия на оценки доли воспроизводимых реанализами полярных циклонов, установлено, что оно весьма незначительно при использовании списка из N11, где лишь в одном случае пороговое значение 43 К не было превышено. Однако выявлен существенный эффект данного критерия при использовании списка из S15, в котором оказалось около 17 % случаев с разницей температур меньше этого значения. Разница температур ТПО-Т500 для полярных циклонов из списка из S15 находится в диапазоне 36–55 К, среднее значение параметра равняется 46 К. Схожие значения (34–54 К) были получены в работе (Blechschmidt et al., 2009) для полярных циклонов, входящих в климатологию (Blechschmidt, 2008), составленную также в соответствии с определением полярных циклонов (Rasmussen, Turner, 2003), но лишь за двухлетний период. По результатам анализа 131 случая полярных циклонов по списку, полученному на основе N11, с использованием данных реанализа ERA-Interim в работе (Terpstra et al., 2016) приводятся значения ТПО-Т500 в диапазоне 33–53 К. Кроме того, в работе (Terpstra et al., 2016) было установлено, что пороговое значение в 43 К в основном не достигается во время генерации и развития полярных циклонов, образовавшихся в условиях «прямого сдвига», доля которых, как найдено авторами работы (Terpstra et al., 2016), составляет 19 % от общего количества полярных циклонов. Таким образом, применение этого критерия может исключать в ином случае хорошо воспроизводимые полярные циклоны, в связи с чем целесообразность его использования со строгим пороговым значением 43 К представляется сомнительной. При отказе от использования критерия статической устойчивости атмосферы, доля полярных циклонов из списка из S15, воспроизводимых реанализами, вырастет и станет составлять 31 % и 80 % для реанализов ERA-Interim и ASR соответственно. Тот же результат может быть достигнут и при уменьшении порогового значения до 36 К, поскольку ни в списке из N11, ни в списке из S15 не содержится полярных циклонов, образовавшихся при разнице температур ТПО-Т500 менее 36 К. Таким образом, пороговое значение 36 К может являться более корректным для критерия атмосферной устойчивости, использование которого все же необходимо в исследованиях, применяющих автоматические процедуры отслеживания полярных циклонов. Полный отказ от данного критерия в подобных исследованиях может привести к множественному ошибочному отбору систем, не относящихся к подклассу полярных циклонов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Впервые оценена степень воспроизведения полярных циклонов новым реанализом высокого разрешения, разработанным специально для арктического региона, а также проведено сравнение с оценками, получаемыми с использованием реанализа ERA-Interim. Отмечены значительные улучшения, подтверждающие способность реанализа ASR лучше воспроизводить мезомасштабные явления. Эффективное разрешение ASR составляет 150 км (Moore et al., 2015), чего в большинстве случаев

оказывается достаточно для полярных циклонов, характеризующихся средним пространственным размером 300 км (Blechschmidt, 2008; Smirnova et al., 2015). Значения относительной завихренности на уровне 850 гПа в полярных циклонах в реанализе ASR выше по сравнению с реанализом ERA-Interim, обладающим эффективным разрешением 400 км (Moore et al., 2015). Приблизительно двукратное увеличение количества полярных циклонов, выполняющих данный критерий, наблюдается как при использовании списка из N11, включающего 46 полярных циклонов, так и при использовании более полного списка из S15, содержащего 158 случаев за тот же временной период. Данные о скорости приводного ветра в полярных циклонах также более реалистичны в реанализе ASR и, согласно проведенному анализу, находятся в хорошем соответствии со спутниковыми измерениями. Как обнаружено, приблизительно 48 % полярных циклонов из списка из N11 воспроизводится реанализом ERA-Interim. Для ASR эта доля составляет 89 %, что значительно больше максимальных оценок, приведенных в предшествующих работах для других реанализов, включая случаи, когда данные реанализа использовались в качестве начальных условий при расчетах негидростатической мезомасштабной модели.

Установлено, что при получении подобных оценок существенное влияние может оказывать полнота используемого списка полярных циклонов. При использовании списка из S15, который содержит в 3,5 раза больше случаев, чем список из N11 за один и тот же временной период, доля воспроизводимых полярных циклонов заметно уменьшается. Как получено в настоящей работе, все три установленных критерия выполняются в 26 и 66 % случаев из списка из S15 по данным реанализов ERA-Interim и ASR соответственно. Следует отметить, что эта разница не связана с увеличением длины выборки. Скорее, она связана с природой самих используемых списков. Так, спутниковая климатология S15 составлена в соответствии с общепринятым компромиссным определением, предложенным в работе (Rasmussen, Turner, 2003) и предъявляющим к полярным циклонам условия малых диаметра и времени существования, а также высокой скорости приводного ветра. В климатологию же N11 случаи включались лишь тогда, когда благоприятные условия для их образования отображались в модельных данных. Еще одно различие заключается в том, что климатология N11 содержит лишь один наиболее интенсивный циклон из группы полярных циклонов, образовавшихся в общих синоптических условиях.

Показано, что использование строгого порогового значения критерия устойчивости атмосферы в работах, связанных с воспроизведением полярных циклонов атмосферными реанализами или применением автоматических процедур для отслеживания циклонов, ведет к исключению значительного числа полярных циклонов, в которых по данным реанализов воспроизводятся высокие значения как относительной завихренности, так и скорости приводного ветра. Как установлено, задание порогового значения в 36 К позволяет избежать исключения подобных полярных циклонов. Дальнейшие исследования значимости критерия устойчивости атмосферы для автоматических процедур отслеживания циклонов и влияния изменений его порогового значения на корректный отбор максимально возможного количества случаев наряду с минимизацией количества ошибок, безусловно, необходимы.

Данное исследование было выполнено при поддержке гранта РФФИ №16-35-00504.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Луценко Э.И., Лагун В.Е. Полярные мезомасштабные циклонические вихри в атмосфере Арктики: Справочное пособие. СПб.: ААНИИ, 2010. С. 96. URL: http://www.aari.ru/projects/mesocyclone/mez_arc.pdf [дата обращения 02.03.2017].
- 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. doi: 10.7868/S0205961415040119
- Blechschmidt A.-M. A 2-year climatology of polar low events over the Nordic seas from satellite remote sensing // Geophysical Research Letters. 2008. Vol. 35. L09815. doi:10.1029/2008GL033706.
- Blechschmidt A.-M., Bakan S., Graßl H. Large-scale atmospheric circulation patterns during polar low events over the Nordic seas // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. 2009. Vol. 114. D06115. doi:10.1029/2008JD010865.
- Bobylev L.P., Zabolotskikh E.V., Mitnik L.M., Mitnik M.L. Atmospheric water vapor and cloud liquid water retrieval over the Arctic Ocean using satellite passive microwave sensing // IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing. 2010. Vol. 48. № 1. P. 283–294. doi:10.1109/TGRS.2009.2028018
- Bromwich D.H., Hines K.M., Bai L.-S. Development and Testing of Polar Weather Research and Forecasting Model: 2. Arctic Ocean // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. 2009. Vol. 114. D08122. doi:10.1029/2008JD010300.
- Bromwich D., Kuo Y.H., Serreze M., Walsh J., Bai L.S., Barlage M. et al. Arctic system reanalysis: Call for community involvement // Eos, Transactions American Geophysical Union. 2010. Vol. 91. № 2. P. 13–14. doi:10.1029/2010EO020001
- Bromwich D.H., Wilson A.B., Bai L.S., Moore G.W., Bauer P. A comparison of the regional Arctic System Reanalysis and the global ERA–Interim Reanalysis for the Arctic // Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. 2016. Vol. 142. P. 644–658. doi:10.1002/qj.2527.
- Bracegirdle T.J., Gray S.L. An objective climatology of the dynamical forcing of polar lows in the Nordic seas // International Journal of Climatolog. 2008. Vol. 28. № 14. P. 1903–1919. doi:10.1002/joc.1686.
- Dee D.P. et al. The ERA–Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system // Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. 2011. Vol. 137. № 656. P. 553–597. doi:10.1002/qj.828
- Hines K.M., Bromwich D.H. Development and testing of Polar WRF. Part I. Greenland ice sheet meteorology // Monthly Weather Review. 2008. Vol. 136. P. 1971–1989. doi:10.1175/2007MWR2112.1.
- 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 // Monthly Weather Review. 2014. Vol. 142. P. 2271–2289. doi:10.1175/MWR-D-13-00171.1.
- Moore G.W.K., Renfrew I.A., Harden B.E., Nernild S.H. The impact of resolution on the representation of southeast Greenland barrier winds and katabatic flows // Geophysical Research Letters. 2015. Vol. 42. doi:10.1002/2015GL063550.
- Noer G., Saetra Ø., Lien T., Gusdal Y. A climatological study of polar lows in the Nordic Seas // Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. 2011. Vol. 137. № 660. P. 1762–1772. doi:10.1002/qj.846.
- Rasmussen E., Turner J. Polar Lows: Mesoscale Weather Systems in the Polar Regions. Cambridge, U.K.: Cambridge Univ. Press, 2003. 624 p.
- Sardeshmukh P.D., Hoskins B.I. Spatial smoothing on the sphere // Monthly Weather Review. 1984. Vol. 112. № 12. P. 2524–2529. doi:10.1175/1520-0493(1984)112<2524:SSOTS>2.0.CO;2

Smirnova J.E., Golubkin P.A., Bobylev L.P., Zabolotskikh E.V., Chapron B. Polar low climatology over the Nordic and Barents seas based on satellite passive microwave data // *Geophysical Research Letters*. 2015. Vol. 42. № 13. P. 5603–5609. doi:10.1002/2015GL063865

Terpstra A., Michel C., Spengler T. Forward and reverse shear environments during polar low genesis over the Northeast Atlantic // *Monthly Weather Review*. 2016. Vol. 144. № 4. P. 1341–1354. doi:10.1175/MWR-D-15-0314.1

Wilhelmsen K. Climatological study of gale-producing polar lows near Norway // *Tellus, Ser. A*. 1985. Vol. 37. P. 451–459. doi:10.1111/j.1600-0870.1985.tb00443.x.

Yanase W., Niino H., Watanabe S.I.I., Hodges K., Zahn M., Spengler T., Gurvich I.A. Climatology of polar lows over the Sea of Japan using the JRA-55 reanalysis // *Journal of Climate*. 2016. Vol. 29. № 2. P. 419–437. doi:10.1175/JCLI-D-15-0291.1

Zahn M., Storch H. von. A long term climatology of North Atlantic polar lows // *Geophysical Research Letters*. 2008. Vol. 35. L22702. doi:10.1029/2008GL035769.

Zappa G., Shaffrey L., Hodges K. Can Polar Lows be Objectively Identified and Tracked in the ECMWF Operational Analysis and the ERA-Interim Reanalysis? // *Monthly Weather Review*. 2014. Vol. 142. P. 2596–2608. doi:10.1175/MWR-D-14-00064.1.

J.E. SMIRNOVA, P.A GOLUBKIN

ESTIMATING PROPORTION OF POLAR LOWS RESOLVED BY ATMOSPHERIC REANALYSES USING DIFFERENT DATA SETS

For the first time representation of polar lows in the Arctic System Reanalysis (ASR), which was created specifically for the Arctic region, is estimated and compared to that of ERA-Interim. As obtained, ERA-Interim and ASR, correspondingly, resolve 48 and 89 % of cases from a widely used polar low list. The fraction of polar lows resolved by ASR is therefore considerably higher than was reported for other reanalyses in previous studies. ASR sea surface wind speed data were shown to be in good agreement with satellite-derived estimates. This is in contrast to ERA-Interim which significantly underestimates wind speed in polar low situations. As found, usage of an alternative polar low list leads to notable changes in the resulting estimates. As estimated for a more complete polar low list, polar low representation in ERA-Interim and ASR decreased to 26 and 66 %, correspondingly. Atmospheric static stability criterion was found to influence resulting percentages as well.

Keywords: polar lows, atmospheric reanalyses, Arctic System Reanalysis, ERA-Interim, relative vorticity, wind speed