DOI:10.21513/2410-8758-2020-2-58-75 УДК 551.557

КЛИМАТИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ВЕТРА В СВОБОДНОЙ АТМОСФЕРЕ СЕВЕРНОГО ПОЛУШАРИЯ: МНОГОЛЕТНИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ТЕНДЕНЦИИ ИЗМЕНЧИВОСТИ

А.С. Лавров, А.В. Хохлова*

Федеральное государственное бюджетное учреждение
«Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации – Мировой центр данных»,
Россия, 249035, Обнинск, Королева, 6;
адрес для переписки: fliorcid@yandex.ru*

Реферат. Ветер в свободной атмосфере является одним из процессов, рекомендованных Всемирной метеорологической организацией для климатического мониторинга. Анализ ветрового режима в больших пространственных масштабах представляет определенные трудности, поскольку как вертикальное, так и горизонтальное распределение скорости ветра отличается большой изменчивостью. Для того, чтобы иметь представление об общих характеристиках ветрового режима в основных атмосферных слоях, во Всероссийском научно-исследовательском институте гидрометеорологической информации – Мировом центре данных (ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД») в рамках развития системы климатического мониторинга разработана методика мониторинга ветрового режима свободной атмосферы над территорией Российской Федерации.

Целью настоящей статьи является дальнейшее развитие этих работ как в отношении региона, так и в смысле направлений исследования. В статье приводятся результаты мониторинга скорости ветра в свободной атмосфере не только над территорией России, но и над всем Северным полушарием, проводится сопоставление результатов, полученных по данным радиозондирования и по данным реанализа пятого поколения ERA5, а также рассмотрены тенденции изменчивости ветрового режима за период 1985-2018 гг.

Анализ характеристик ветра в тропосфере и нижней стратосфере Северного полушария выполнен в соответствии с методикой, разработанной ранее для мониторинга ветрового режима скорости ветра в свободной атмосфере. Анализ был расширен на все Северное полушарие с использование двух источников данных: массив многолетних радиозондовых измерений, создаваемый в ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД», и реанализ пятого поколения ERA5. Результаты мониторинга, полученные на основе двух источников данных, качественно и количественно соответствуют друг другу в областях, охваченных сетью аэрологических станций, за исключением отдельных высокогорных регионов.

Распределение многолетних средних значений в общих чертах совпадает с распределением скорости ветра, полученным в более ранних исследованиях.

При этом каждый год отличается своими особенностями, смещением зон слабых и сильных ветров и их интенсивности.

Тенденции изменчивости за период 1985-2018 гг. в разных регионах Северного полушария были разнонаправлены. Наиболее сильные отрицательные тренды скорости ветра, достигающие значений -1.5 м·с$^{-1}$ за 10 лет, имели место в нижней стратосфере севернее 55-60° с.ш. Это может свидетельствовать об ослаблении зимнего западно-восточного переноса в этом регионе. В поясе широт 30-45° с.ш. над европейско-азиатским регионом, напротив, имели место положительные тренды, достигающие значений 1.1 м·с$^{-1}$ за 10 лет.

Ключевые слова. Ветер, свободная атмосфера, Северное полушарие, климат, радиозонды, реанализ.

Введение

Ветровой режим является одной из важнейших характеристик метеорологических параметров атмосферы. Ветер определяет погодно-климатические условия и их изменения, а также перенос количества движения, тепла и влаги. Временная изменчивость ветра является одной из обсуждаемых проблем, в основном, в контексте ветроэнергетики, сельского хозяйства и других экономических вопросов. По данным наземных наблюдений почти на всей территории Российской Федерации за исключением полярных регионов отмечаются отрицательные аномалии скорости ветра (Доклад…, 2019; Доклады Росгидромета за предыдущие годы на сайте Института глобального климата и экологии: http://www.igce.ru/). Большинство исследователей также сходятся во мнении, что с 80-х годов прошлого столетия происходило замедление скорости ветра, однако в последнее время обнаружена тенденция к ее увеличению (Zeng et al., 2019). Исследуется связь экстремальных характеристик ветра с изменениями климата (Cheng et al., 2014).

Ветер в свободной атмосфере входит в число основных параметров, рекомендованных ВМО для климатического мониторинга (The Global Observing System…, 2013; WMO: Essential Climate Variable…, 2016). Исследованиям режима ветра в свободной атмосфере обычно уделяется гораздо меньше внимания, чем другим метеоэлементам (IPCC, 2013). Тем не менее, отдельные исследователи обнаруживают статистически значимые тренды характеристик ветра в различных регионах земного шара, что свидетельствует об изменении ветрового режима в свободной атмосфере с течением времени. Так, например, в работе (Allen, Sherwood, 2008) обнаружены положительные тренды зонального ветра в верхней тропосфере и стратосфере северной внетропической зоны и положительные тренды в верхней тропосфере тропиков. В работе (Vautardetal, 2010) обнаружено увеличение скорости ветра в нижней и средней тропосфере над Европой и Северной Америкой и уменьшение скорости ветра над Канадой и Восточной Азией. В работе (Хохлова, Тимофеев, 2011) показано, что в период 1961-2003 в свободной атмосфере над европейской территорией России происходило увеличение скорости ветра, особенно заметное в зимний период.

Анализ ветрового режима в больших пространственных масштабах представляет определенные трудности, поскольку как вертикальное, так и горизонтальное распределение ветра отличается большой изменчивостью. Для того чтобы иметь представление об общих характеристиках ветрового режима в основных атмосферных слоях, в ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД» в рамках развития системы климатического мониторинга разработана методика мониторинга ветрового режима свободной атмосферы (Лавров и др., 2017) над территорией Российской Федерации по данным многолетних радиозондовых наблюдений. Основные результаты публикуются ежегодно в Докладе Росгидромета об особенностях климата на территории Российской Федерации (Доклад…, 2019), а также в других научных источниках (Lavrov et al., 2018). Наряду с изучением особенностей ветрового режима за отдельные годы представляют интерес другие задачи, в том числе, согласуются ли результаты анализа данных, полученных из разных источников, имеется ли многолетняя изменчивость ветрового режима, и другие.

Целью настоящей работы является исследование климатических характеристик ветра в свободной атмосфере, расширенное как с точки зрения региона, так и в смысле направлений анализа. В статье приводятся результаты мониторинга скорости ветра в свободной атмосфере не только над территорией России, но и над всем Северным полушарием, проводится сопоставление результатов, полученных по данным радиозондирования и по данным реанализа пятого поколения ERA5 (Hoffman et al., 2019), а также рассмотрены тенденции изменчивости ветрового режима за период 1985-2018 гг.

Данные и метод

Основной информационной базой для мониторинга скорости ветра служит глобальный массив радиозондовых наблюдений, создаваемый в ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД» (Алдухов, Черных, 2013; Казначеева, Руденкова, 1985). В массиве собраны аэрологические данные с 1978 г. по российским станциям и с 1984 г. по зарубежным станциям. Схема обработки данных для мониторинга выполняется в несколько этапов:

На основе собранных месячных порций радиозондовых данных срочных наблюдений рассчитывается массив месячных статистических характеристик ветрового режима, включающий в себя среднее значение скорости ветра и средние компоненты скорости ветра на 15 стандартных изобарических поверхностях от 1000 гПа до 10 гПа для каждой станции в отдельности.

С помощью взвешенного вертикального обобщения рассчитываются также значения характеристик ветрового режима в основных слоях атмосферы: 850-300 гПа (тропосфера), 100-50 гПа (нижняя стратосфера).

Для каждой станции рассчитываются нормы характеристик ветра на всех изобарических поверхностях и в указанных слоях, осредненные за период 1985-2014 гг.

Рассчитываются месячные аномалии характеристик ветрового режима. Аномалии характеристик ветрового режима на стандартных изобарических

поверхностях и в каждом из указанных слоев атмосферы для каждого месяца вычисляются для каждой станции для сроков 00 и 12 UTC в отдельности. После этого, в пределах месяца, вычисленные нормы и аномалии осредняются по срокам. При осреднениях, как в пределах месяца, так и при дальнейших обобщениях, используются веса, равные числу признанных при контроле корректными соответствующих срочных значений характеристик ветрового режима.

Проводится осреднение постанционных месячных аномалий по сезонам для каждого сезона исследуемого года, а также для исследуемого года в целом. Зимний сезон при этом начинается с декабря года, предшествующего исследуемому. Оценки для года в целом охватывают период январь-декабрь.

Рассчитываются линейные тренды средней скорости ветра и среднего зонального и меридионального ветра методом наименьших квадратов, а также оценивается их значимость для каждой станции в отдельности на всех рассматриваемых изобарических поверхностях и в слоях атмосферы.

Выбор периода для расчета норм характеристик ветра (1985-2014 гг.), а также периода для оценки линейных трендов (1985-2018 гг.) связан с тем, что в массиве данных ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД» аэрологические данные с зарубежных станций собираются с 1984 года, причем в 1984 году данные за неполный год.

В отличие от температуры воздуха, которая имеет в основном зональный характер, ветер является существенно изменчивым параметром, поэтому пространственное обобщение для него не проводится. Выполняется только вертикальное осреднение для двух слоев – тропосфера и нижняя стратосфера. Представление полученных результатов производится в основном на картах. Построение карт производится при помощи пакета IDL (Interactive Data Language, https://www.harrisgeospatial.com/docs/idl_programming.html). Постанционные оценки характеристик ветра интерполируются в узлы регулярной сетки 1x1 градус методом кригинга с использованием стандартных средств IDL.

Сеть аэрологических станций в Северном полушарии неравномерна и практически не охватывает атмосферу над океанами. В некоторых регионах, например в Европе или на востоке Китая, сеть станций достаточно плотная, в других, таких как в Африке и Центральной Азии, сильно разрежена. Поэтому, для подтверждения полученных результатов, а также качества интерполяции, проводилось сопоставление результатов мониторинга с аналогичными результатами, полученными по данным массивов реанализа ERA5 (Hoffman et al., 2019). ERA5 – это глобальный атмосферный реанализ пятого поколения, разрабатываемый Европейским центром среднесрочных прогнозов погоды (ECMWF). Проверенные данные ERA5 обновляется ежемесячно с задержкой в 3 месяца, а предварительные – ежедневно с задержкой в 5 дней, что позволяет использовать реанализ в качестве дополнительного источника информации для целей мониторинга климата. Данные реанализа ERA5 доступны с 1979 года по настоящее время, но в настоящем исследовании используются данные с 1985 года для соответствия данным, доступным в массиве данных

ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД». Данные реанализа были обработаны таким же образом, как и данные станций, для каждого узла сетки 1x1 градус.

Сравнение характеристик, полученных по разным источникам

Климатические характеристики ветра, полученные по радиозондовым данным и по данным реанализа, показывают общее совпадение. Это можно видеть как на многолетних средних характеристиках, так и на особенностях поля ветра за отдельные годы. На рис. 1 приведены среднегодовые скорости ветра за период 1985-2014 гг. для тропосферы и нижней стратосферы по радиозондовым данным и по данным реанализа. Области на левой панели, не охваченные радиозондированием, закрашены черным цветом. Общее распределение скоростей и направлений и значения скоростей в основном совпадают. В отдельных областях расположение изолиний может несколько различаться, например, контур изолинии 15.3 м·с$^{-1}$ в районе 60° с.ш., 80° в.д. в тропосфере по данным радиозондовых данных охватывает несколько большую область, чем по данным реанализа.

На рис. 2 показаны относительные разности многолетних средних значений скорости ветра, рассчитанных по аэрологическим данным и по данным реанализа. Разности рассчитаны для узлов сетки 1x1 градус и отнесены к среднему значению скорости ветра в данном узле:

$$d = \frac{v_i - v_r}{v_i},$$

где d – относительная разность в узле сетки; v_i – значение средней скорости ветра, интерполированное в узел сетки на основе постанционных радиозондовых данных; v_r – значение средней скорости ветра в узле сетки по данным реанализа ERA5.

Из рисунка видно, что в области, охваченной сетью аэрологических станций, разности между аэрологическими данными и данными реанализа в среднем не превышают 5% как в тропосфере, так и в нижней стратосфере, что в абсолютном значении соответствует разнице менее чем в 0.5 м·с$^{-1}$. Существенным исключением являются горные районы Центральной Азии, в частности Тибетское нагорье. Особенно это проявляется для тропосферы. На высокогорных станциях, расположенных на границе этой области, разность между аэрологическими данными и данными реанализа достигает 3 м·с$^{-1}$, что соответствует четверти от среднего значения. Данных со станций, расположенных в Тибете, недостаточно для расчета характеристик ветра в тропосфере, что затрудняет сопоставление. Иная ситуация в нижней стратосфере. Там разница между аэрологическими данными и данными реанализа в этой области не превышает 5%. Сеть аэрологических станций в Африке слишком разрежена для сопоставления. Примечательно, что над Евразией оценки средней скорости ветра на основе аэрологических данных в среднем превышают оценки по данным реанализа, а над Северной Америкой, наоборот, оценки по данным реанализа превышают аэрологические оценки.

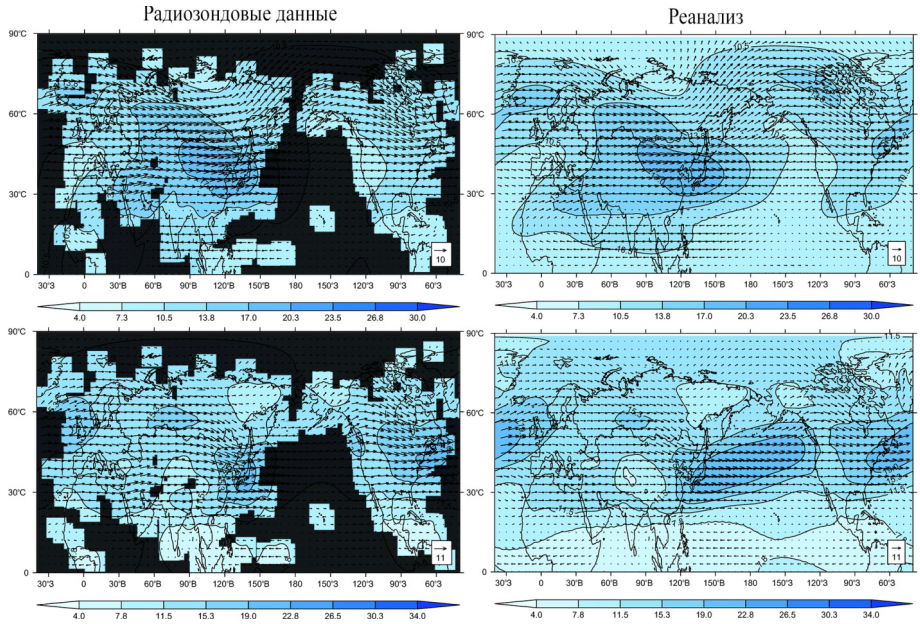

Рисунок 1. Сопоставление средней за 1985-2014 гг. скорости ветра в нижней стратосфере Северного полушария (вверху) и тропосфере (внизу) по данным аэрологических наблюдений ВНИИГМИ-МЦД (левый столбец) и по данным массивов реанализа ERA5

Figure 1. A comparison of the wind speed averages of 1985-2014 in the lower stratosphere of the Northern Hemisphere (upper panels) and the troposphere (lower panels) according to aerological observations of RIHMI-WDC (left panels) and according to reanalysis ERA5 (right panels)

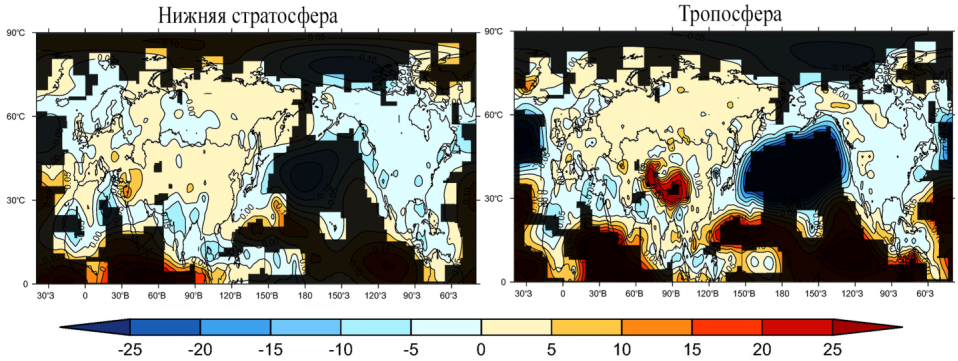

Рисунок 2. Относительные разности в % между средней за 1985-2014 гг. скоростью ветра по данным аэрологических наблюдений ВНИИГМИ-МЦД и по данным массивов реанализа ERA5 в нижней стратосфере и тропосфере северного полушария

Figure 2. Relative differences in % between the wind speed averages of 1985-2014 according to aerological observations of RIHMI-WDC and ERA5 reanalysis data for the lower stratosphere and troposphere of the Northern Hemisphere

Характеристики ветрового режима за отдельные годы могут существенно отличаться от многолетних средних, но особенности отдельных сезонов и лет, определенные из разных источников данных, также показывают хорошее совпадение. На рис. 3 и рис. 4 представлены среднесезонные аномалии скорости и направления ветра в тропосфере и нижней стратосфере Северного полу-

шария за 2018 год по данным аэрологических наблюдений ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД» и по данным массивов реанализа ERA5. На рисунках видно соответствие особенностей ветрового режима в свободной атмосфере Северного полушария по данным обоих источников в областях, покрытых сетью аэрологических станций. Обращает на себя внимание волнообразное чередование положительных и отрицательных аномалий скорости ветра в тропосфере в зимне-весенний период в полосе широт 40-60° с.ш. В летне-осенний период эти структуры распадаются на отдельные участки с положительными и отрицательными аномалиями. В нижней стратосфере заметны существенные положительные аномалии, достигающие значений 6-8 м·с$^{-1}$ в регионе, ограниченном координатами 70-90° с.ш. и 150° в.д. - 60° з.д., а также в поясе широт 40-60° с.ш. над Северной Америкой в зимний период. В весенний период они сменяются отрицательными аномалиями. Заметны также значительные положительные аномалии в тропической зоне в летне-осенний период.

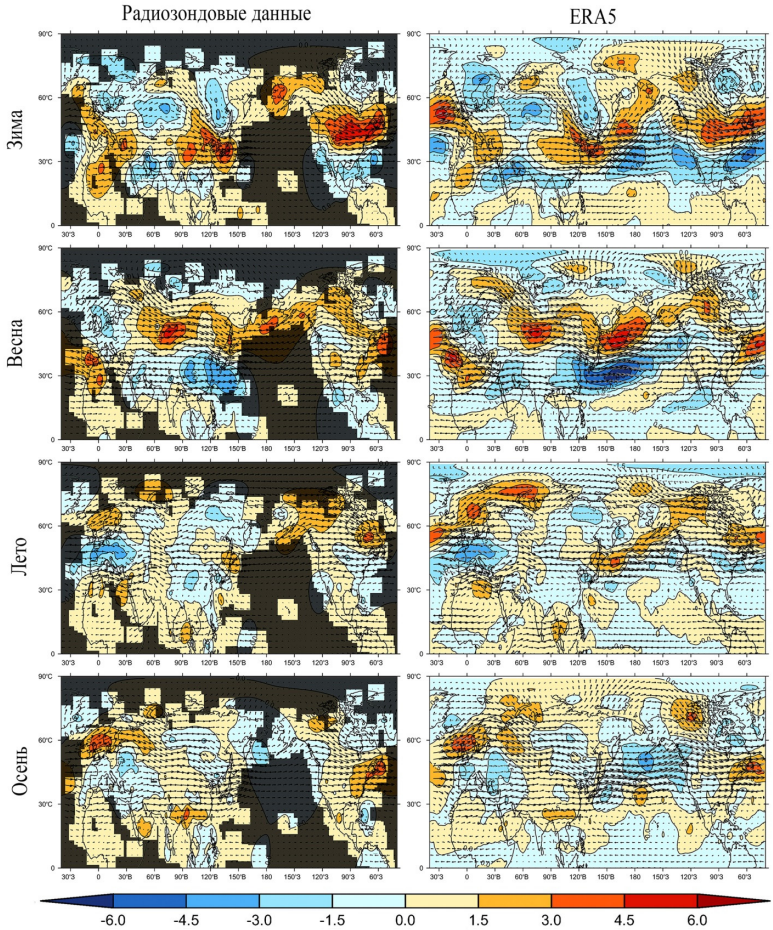

Рисунок 3. Сопоставление среднесезонных аномалий скорости и направления ветра в тропосфере Северного полушария в 2018 году по данным аэрологических наблюдений ВНИИГМИ-МЦД (левый столбец) и по данным массивов реанализа ERA5 (правый столбец)

Figure 3. A comparison of seasonal anomalies of wind speed and direction in the troposphere of the Northern Hemisphere in 2018 according to the data of aerological observations of RIHMI-WDC (left panels) and to the ERA5 reanalysis data (right panels)

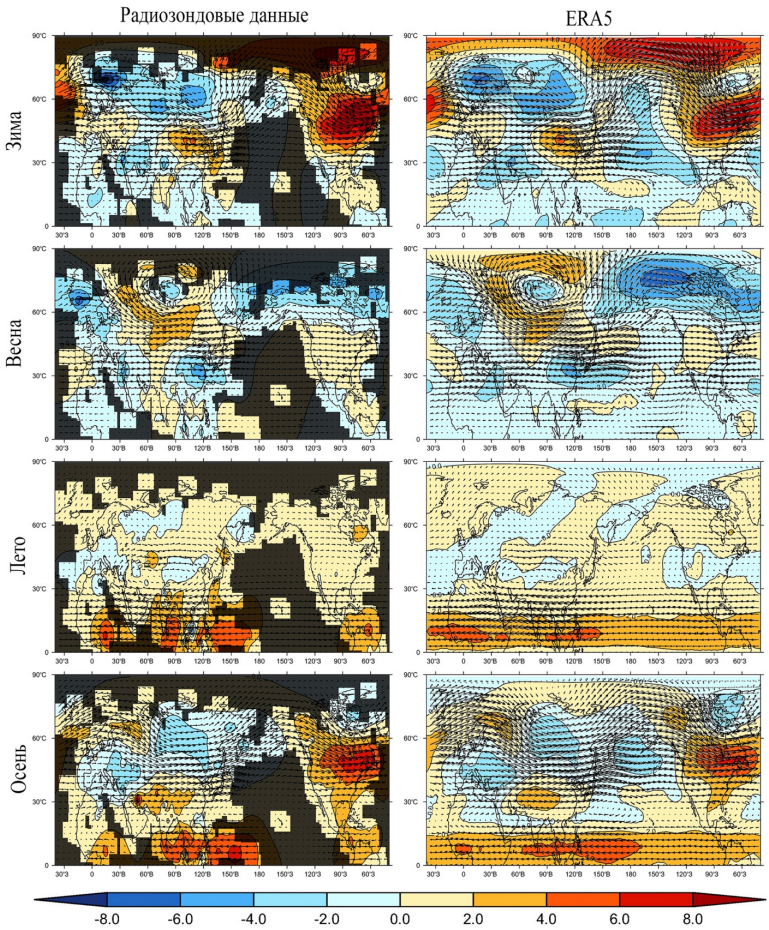

Рисунок 4. Сопоставление среднесезонных аномалий скорости и направления ветра в нижней стратосфере Северного полушария в 2018 году по данным аэрологических наблюдений ВНИИГМИ-МЦД (левый столбец) и по данным массивов реанализа ERA5 (правый столбец)

Figure 4. A comparison of seasonal anomalies of wind speed and direction in the lower stratosphere of the Northern Hemisphere in 2018 according to the data of RIHMI-WDC aerological observations (left panels) and to the ERA5 reanalysis data (right column)

Следует отметить, что особенности режима ветра в анализируемом году могут свидетельствовать о смещении или изменении основных центров циркуляции. Однако этот вопрос представляет собой отдельную, достаточно сложную задачу и не входит в рамки настоящей работы.

Соответствие результатов мониторинга ветрового режима в свободной атмосфере по радиозондовым данным и по данным реанализа ERA5 позволяет судить о приемлемости использования обоих источников для целей мониторинга. Поэтому, в целях полноты анализа в областях, не охваченных сетью аэрологических станций, для оценки особенностей географического распределения характеристик ветра над Северным полушарием использовались данные массивов реанализа ERA5.

Многолетние среднесезонные характеристики

На рис. 5 и рис. 6 даны среднесезонные скорости и направления ветра за период 1985-2014 год, определенные по данным реанализа ERA5. В тропосфере восточный поток на протяжении всего года наблюдается в тропических и приэкваториальных широтах. Скорости ветра в восточном потоке в среднем за год имеют значения до 7.8 м·с$^{-1}$. При этом наибольшие восточные ветры наблюдаются зимой, а наименьшие – осенью.

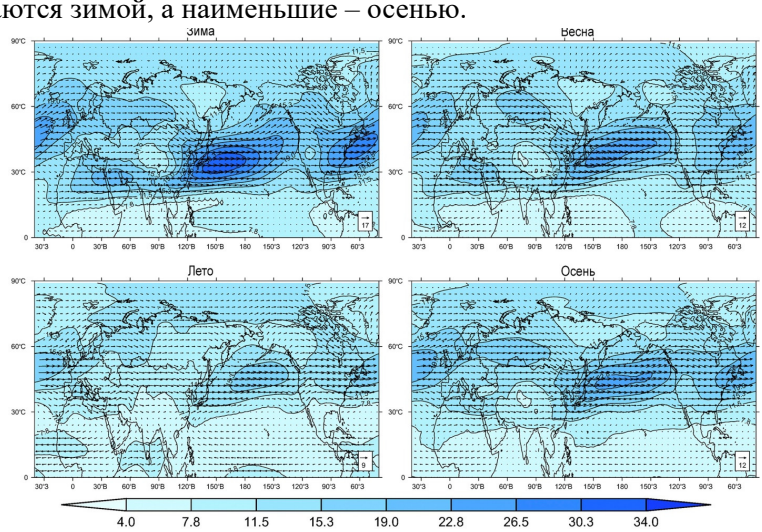

Рисунок 5. Среднесезонные скорости и направления ветра в тропосфере Северного полушария за период 1985-2014 гг. по данным ERA5

Figure 5. Seasonal wind speed and direction in the troposphere of the Northern Hemisphere in 1985-2014 according to ERA5 reanalysis data

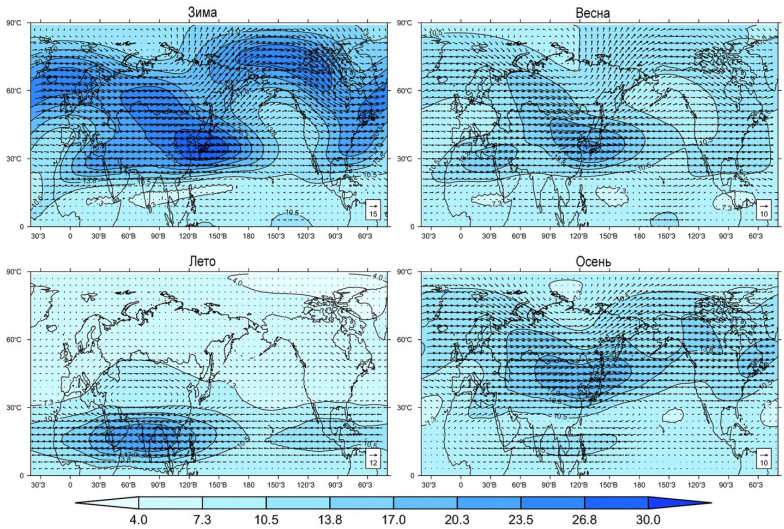

Рисунок 6. Среднесезонные скорости и направления ветра в нижней стратосфере Северного полушария за период 1985-2014 гг. по данным ERA5

Figure 6. Seasonal wind speed and direction in the lower stratosphere of the Northern Hemisphere in 1985-2014 according to ERA5 reanalysis data

Западные ветры имеют два максимума на протяжении всех сезонов: над Тихим океаном восточнее Японии и над Атлантическим океаном на побережье США и Канады. Это области максимальных струйных течений. Зимой средние скорости ветра там достигают 34 м·с$^{-1}$, а летом снижаются до 19 м·с$^{-1}$.

В нижней стратосфере восточный поток также наблюдается в тропических и приэкваториальных широтах, но в отличие от тропосферы не на всех долготах. Зимой и весной на востоке Атлантического и Тихого океанов в тропических широтах преобладает западное направление ветра, а летом и осенью восточное направление наблюдается на всех долготах. Летом восточный ветер достигает наибольших скоростей на севере Индийского океана (до 23.5 м·с$^{-1}$). В верхней стратосфере летом восточный ветер наблюдается над всем Северным полушарием. Анализ среднемесячных значений показывает, что над территорией России восточное направление ветра наблюдается с мая по август на высотах более 30 гПа, и только в июне восточный ветер наблюдается на меньших высотах (70 гПа).

Тенденции изменчивости ветрового режима

Полученное распределение скоростей и направлений ветра над Северным полушарием за 1985-2014 гг. в целом соответствует распределению, описанным И.Г. Гутерманом еще в 1965 году (Гутерман, 1965). Тем не менее, ветровой режим в свободной атмосфере с течением времени изменяется. Статистически значимые тренды характеристик ветра в различных регионах земного шара были обнаружены отдельными исследователями (Allen, Sherwood, 2008; Vautardetal, 2010; Хохлова, Тимофеев, 2011).

Как показывают результаты анализа, тенденции изменчивости имеют разнонаправленный характер в разных регионах земного шара. Естественная изменчивость скорости ветра достаточно велика, тем не менее, в ряде регионов наблюдаются устойчивые тенденции. Это можно видеть на рис. 7 и 8, где приведен временной ход среднесезонных значений за зимний период для двух станций, расположенных в разных географических регионах. Здесь же даны аналогичные графики по данным реанализа.

На одной из этих станций имеет место увеличение скорости ветра как в тропосфере, так и в стратосфере, на другой уменьшение. Здесь же приведены линейные аппроксимации. Коэффициенты детерминации (даны в верхних правых углах графиков) невелики в силу большой естественной изменчивости.

На рис. 9 и рис. 10 представлено распределение сезонных оценок трендов скорости ветра в нижней стратосфере и тропосфере Северного полушария соответственно, рассчитанных за период 1985-2018 гг. по данным массивов реанализа ERA5.

Зимой отрицательные тренды скорости ветра преобладают на широтах севернее 55° с.ш., причем над Россией они статистически значимы. В нижней стратосфере оценки составляют -1.1 м·с$^{-1}$ за 10 лет над западной Сибирью, а в тропосфере достигают -0.8 м·с$^{-1}$ за 10 лет над Канадой. В умеренных широтах (30-60° с.ш.) преобладают положительные тренды скорости ветра, причем в

Азии и над Тихим океаном в тропосфере они статистически значимы и достигают 1.5 м·с$^{-1}$ за 10 лет. В тропосфере на широте 0-15° с.ш. преобладают статистически значимые положительные тренды скорости ветра, а на широте 15-30° с.ш. – статистически значимые отрицательные тренды. В нижней стратосфере статистически значимых оценок трендов в тропических широтах практически нет.

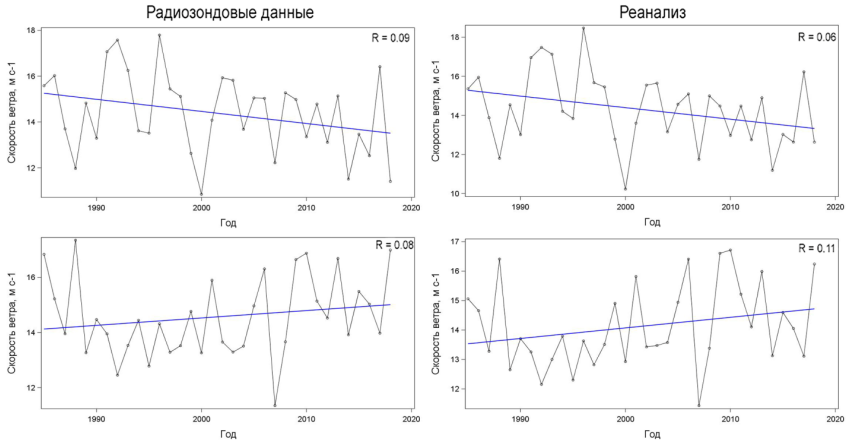

Рисунок 7. Временные ряды средних за зимний период скоростей в тропосфере по радиозондовым данным и по данным ERA5
Вверху – точка с координатами 74.5° с.ш., 19.0° в.д. (станция 01028). Внизу – точка с координатами 39.8° с.ш., 98.5° в.д. (станция 52533)

Figure 7. Time series of winter averages of the wind speed in the troposphere based on radiosonde data and ERA5 reanalysis data
Upper panels: a point with coordinates 74.5°N, 19.0°E (station 01028). Lower panels: a point with coordinates 39.8°N, 98.5°E (station 52533)

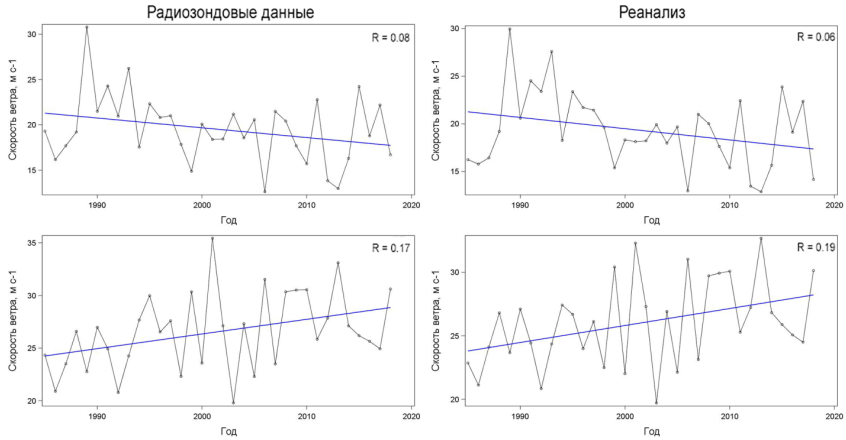

Рисунок 8. Временные ряды средних за зимний период скоростей в нижней стратосфере по радиозондовым данным и по данным ERA5
Вверху – точка с координатами 74.5° с.ш., 19.0° в.д. (станция 01028). Внизу – точка с координатами 39.8° с.ш., 98.5° в.д. (станция 52533)

Figure 8. Time series of winter averages of the wind speed in the lower stratosphere based on radiosonde data and ERA5 reanalysis data
Upper panels: a point with coordinates 74.5° N, 19.0° E (station 01028). At the Lower panels: a point with coordinates 39.8° N, 98.5° E (station 52533)

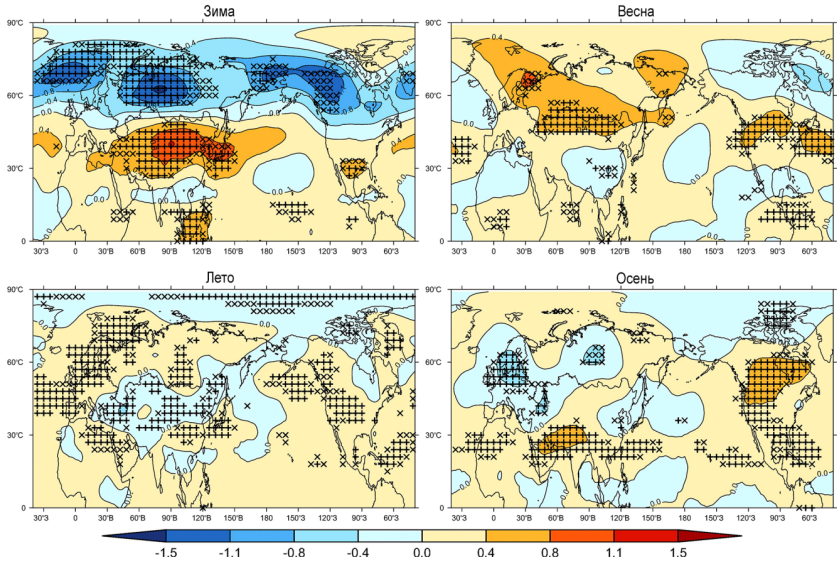

Рисунок 9. Распределение сезонных оценок трендов скорости ветра в нижней стратосфере Северного полушария за период 1985-2018 гг. по данным ERA5, в м·с$^{-1}$ за 10 лет
Прямыми крестиками отмечены тренды, значимо отличные от нуля с вероятностью 0.9; косыми крестиками – с вероятностью 0.85

Figure 9. Distribution of seasonal estimates of wind speed trends (m·s^{-1} decade^{-1}) in the lower stratosphere of the Northern Hemisphere for the period 1985-2018 according to ERA5 reanalysis data
Straight crosses indicate trends significantly different from zero with a probability of 0.9; oblique crosses indicate probability of 0.85

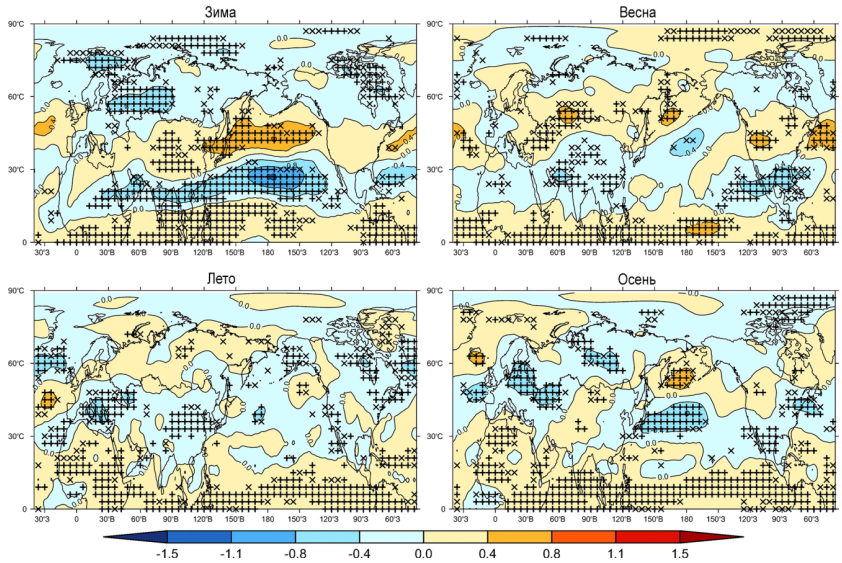

Рисунок 10. Распределение сезонных оценок трендов скорости ветра в тропосфере Северного полушария за период 1985-2018 гг. по данным ERA5, в м·с$^{-1}$ за 10 лет
Прямыми крестиками отмечены тренды, значимо отличные от нуля с вероятностью 0.9; косыми крестиками – с вероятностью 0.85

Figure 10. Distribution of seasonal estimates of wind speed trends (m·s^{-1}·decade^{-1}) in the troposphere of the Northern hemisphere for the period 1985-2018 according to ERA5 reanalysis data
Straight crosses indicate trends significantly different from zero with probability of 0.9; oblique crosses indicate probability of 0.85

Весной положительные тренды скорости ветра преобладают на северной половине Евразии, над США и на юге Канады. В Евразии они сильнее всего выражены на юге России и на севере Казахстана, где оценки трендов достигают 0.8 м·с$^{-1}$ и являются статистически значимыми. В Северной Америке положительные тренды статистически значимы над США. На юго-востоке Азии наблюдаются статистически значимые отрицательные тренды скорости ветра. Также в тропосфере статистически значимые отрицательные тренды наблюдаются над западной Европой. В тропических широтах в тропосфере наблюдаются положительные статистически значимые тренды. Летом над Евразией положительные тренды скорости ветра преобладают на широтах к северу от 50°с.ш. Причем в нижней стратосфере статистически значимы практически все оценки трендов над Европой, а в тропосфере статистически значимые оценки трендов наблюдаются только в отдельных регионах. Южнее 50°с.ш. над Евразией преобладают отрицательные тренды скорости ветра, но в нижней стратосфере на юго-востоке Китая находится область положительных статистически значимых трендов. Обла-сти статистически значимых отрицательных оценок в нижней стратосфере расположены на севере Китая и над Черным морем, а в тропосфере – на юге Европы и на юго-востоке Азии. В Северной Америке положительные тренды в нижней стратосфере наблюдаются над всем материком, а в тропосфере преобладают отрицательные тренды.

Осенью в нижней стратосфере над Европой и северо-западной Азией преобладают отрицательные тренды скорости ветра, причем над Европой они статистически значимы. Статистически значимые положительные тренды наблюдаются на юге Азии. Над Северной Америкой над всем материком наблюдаются статистически значимые положительные тренды скорости ветра в нижней стратосфере. В тропосфере над всем северным полушарием преобладают отрицательные тренды скорости. Области статистически значимых оценок расположены в Восточной Европе и на северо-востоке США. Статистически значимые положительные тренды скорости ветра наблюдаются только над Беринговым морем и на северо-востоке США.

Заключение

Анализ характеристик ветра в тропосфере и нижней стратосфере Северного полушария выполнен в соответствии с методикой, разработанной для мониторинга ветрового режима скорости ветра в свободной атмосфере, расширенной на все Северное полушарие, по двум источникам данных: массив многолетних радиозондовых измерений, создаваемый в ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД», и реанализ пятого поколения ERA5. Результаты анализа включают в себя обобщения с разным временным масштабом и оценки изменчивости за исследуемый период времени (1985-2018 гг.). Результаты мониторинга, полученные на основе двух источников данных, качественно и количественно соответствуют друг другу в областях, охваченных сетью аэрологических станций, за исключением отдельных высокогорных регионов.

Распределение многолетних средних значений в общих чертах совпадает с распределением скорости ветра, полученным в более ранних исследованиях, при этом каждый год отличается своими особенностями, смещением зон слабых и сильных ветров и их интенсивности.

Тенденции изменчивости за период 1985-2018 гг. в разных регионах Северного полушария имели разнонаправленный знак. Не повторяя описание распределения тенденций, отметим, что наиболее сильные отрицательные тренды скорости ветра, достигающие значений -1.5 м·с$^{-1}$ за 10 лет, имели место в нижней стратосфере севернее 55-60°с.ш. Это может свидетельство-вать об ослаблении зимнего западно-восточного переноса в этом регионе. В поясе широт 30-45°с.ш. над европейско-азиатским регионом, напротив, имели место положительные тренды, достигающие значений 1.1 м·с$^{-1}$ за 10 лет. В настоящей статье приведены только результаты анализа многолетних наблюдений. Безусловно, представляет интерес более подробное исследова-ние динамики поля ветра и его связи с другими параметрами климатического мониторинга, а также с особенностями элементов общей циркуляции. В силу сложного пространственного распределения поля ветра это представляет собой отдельную задачу, требующую дальнейших разработок.

Благодарности

Авторы выражают искреннюю благодарность Александру Марковичу Стерину за постоянную поддержку и интерес к проводимым исследованиям.

Список литературы

Алдухов О.А., Черных И.В. 2013. Методы анализа и интерпретации данных радиозондирования атмосферы. Том 1. Контроль качества и обработка данных. – Обнинск, ФГБУ "ВНИИГМИ-МЦД", 306 с.

Гутерман И.Г. 1965. Распределение ветра над северным полушарием. – Л.: Гидрометеоиздат, 246 с.

Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации в 2018 году. 2019. – М., Росгидромет, 79 с. URL: http://www.meteorf.ru/upload/pdf_download/o-klimate-rf-2018.pdf (дата обращения 10.02.2020).

Казначеева В.Д., Руденкова Т.В. 1985. Организация текущих аэрологических данных на магнитных лентах ЕС. – Труды ВНИИГМИ-МЦД, вып. 115, с. 91-108.

Лавров А.С., Хохлова А.В., Стерин А.М. 2017. Мониторинг климатических параметров температуры и ветра в свободной атмосфере: технологические аспекты. – Труды Гидрометцентра России, вып. 366, с. 98-112. URL: http://method.meteorf.ru/publ/tr/tr366/sterin.pdf (дата обращения 10.02.2020).

Хохлова А.В., Тимофеев А.А. 2011. Многолетние изменения ветрового режима в свободной атмосфере на европейской территорией России. – Метеорология и гидрология, № 4, с. 21-33.

Allen R.J., Sherwood S.C. 2008. Warming maximum in the tropical upper troposhpere deduced from thermal winds. – Nature Geoscience, vol. 1, pp. 399-403. Available at: https://doi.org/10.1038/ngeo208 (accessed 10 February 2020).

Cheng Ch., Lopes E. et al. 2014. Possible impacts of climate change on wind gusts under downscaled future climate conditions: updated for Canada. – Jour. Climate, pp. 1255-1270. Available at: https://doi.org/10.1175/JCLI-D-13-00020.1 (accessed 10 February 2020).

Hoffmann L., Gunther G. et al. 2019. From ERA-Interim to ERA5: the considerable impact of ECMWF's next-generation reanalysis on Lagrangian transport simulations. – Atmos. Chem. Phys., vol. 19, pp. 3097-3124. Available at: https://doi.org/10.5194/acp-19-3097-2019 (accessed 10 February 2020).

IPCC 2013. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Stocker T.F., Qin D. et al. – Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 p. Available at: https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/ (accessed 10 February 2020).

Lavrov A.S., Sterin A.M., Khohlova A.V. 2018. Upper-air climate monitoring: data sources, technological aspects, and some results. – IOP Conf., Ser.: Earth Environ. Sci., vol. 211, No. 1. Available at: https://www.researchgate.net/publication/329733290_Upperair_climate_monitoring_data_sources_technological_aspects_and_some_results (accessed 10 February 2020).

The Global Observing System for Climate: Implementation Needs. 2016. – WMO GCOS Implementation plan, 325 p. Available at: https://unfccc.int/sites/default/files/gcos_ip_10oct2016.pdf (accessed 10 February 2020).

Vautard R., Cattiaux J., Yiou P. 2010. Nothern hemisphere atmospheric stilling partly attributed to an increase in surface roughness. – Nature Geoscience, vol. 3, pp. 756-761.

WMO: Essential Climate Variable (ECV) Factsheet. 2016. – Available at: https://public.wmo.int/en/programmes/global-climate-observing-system/essential-climate-variables. (accessed 10 February 2020).

Zeng Z., Ziegler A.D., Searchinger T. et al. 2019. A reversal in global terrestrial stilling and its implications for wind energy production. – Nat. Clim. Chang., vol. 9, pp. 979-985. Available at: https://doi.org/10.1038/s41558-019-0622-6 (accessed 10 February 2020).

Статья поступила в редакцию: 24.02.2020 г. *После переработки: 16.04.2020 г.*

CLIMATE MONITORING OF WIND IN THE FREE ATMOSPHERE OF THE NORTHERN HEMISPHERE: LONG-TERM CHARACTERISTICS AND VARIABILITY TRENDS

A.S. Lavrov, A.V. Khokhlova*

Federal state budgetary institution "Russian research Institute of hydrometeorological information – World data center»,
6 Korolyovstreet, 249035, Obninsk, Russian Federation; *wdcb@meteo.ru*
*corresponding author: *fliorcid@yandex.ru*

Abstract. Wind in a free atmosphere is one of the processes recommended by the World Meteorological Organization for climate monitoring. Analysis of the wind regime at large spatial scales presents certain difficulties, since both vertical and horizontal wind speed distribution is highly variable. In order to assess the characteristics of the wind regime in the main atmospheric layers, the All-Russian Research Institute of Hydrometeorological Information – World Data Centre (RIHMI-WDC) has developed a methodology for monitoring the wind regime of the free atmosphere over the territory of the Russian Federation. The purpose of this work is to further develop the studies in relation to both research areas and the regions. The paper presents the results of the wind speed monitoring in the free atmosphere over the territory of Russia and, more widely, over the entire Northern Hemisphere. In particular, the results obtained from radiosonde data and from ERA5 reanalysis are compared. The trends in wind variability over the period 1985-2018 are also considered. The analysis of wind characteristics in the troposphere and lower stratosphere of the Northern Hemisphere was performed in accordance with the methodology developed earlier for monitoring the wind speed regime in the free atmosphere. The analysis was extended to the entire Northern Hemisphere using two data sources: the data set of long-term radiosonde measurements compiled at the RIHMI-WDC, and the ERA5 reanalysis. The monitoring results obtained from the two data sources are qualitatively and quantitatively similar in the areas covered by the network of upper-air stations. Some exception found in few high-altitude regions. The distribution of long-term averages in general is similar to the distribution of wind speed obtained in earlier studies. However, any year may differ in its own characteristics, e.g., the displacement of zones of weak and strong winds and their intensity. The trends of variability in 1985-2018 in different regions of the Northern Hemisphere were not unidirectional. The strongest negative trends in the wind speed reaching -1.5 $m \cdot s^{-1} \cdot decade^{-1}$ occurred in the lower stratosphere North of 55-60°N. This may indicate a weakening of the winter West-East transport in this region. In contrast, above the Eurasian region in the latitude zone of 30-45°N the positive trends reaching 1.1 $m \cdot s^{-1} \cdot decade^{-1}$ were observed.

Keywords. Wind, free atmosphere, Northern hemisphere, climate, radiosondes, reanalysis.

References

Alduhov O.A., Chernyh I.V. 2013. *Metody analiza i interpretacii dannyh radiozondirovaniya atmosfery. Tom 1. Kontrol' kachestva i obrabotka dannyh* [Methods of analysis and interpretation of atmospheric radiosonding data. Vol. 1. Quality control and data processing]. Obninsk, 306 p.

Guterman I.G. 1965. *Raspredelenie vetra nad severnym polushariem* [Distribution of the wind over the Northern hemisphere]. 1965. Leningrad, 246 p.

Doklad ob osobennostyah klimata na territorii Rossijskoj Federacii v 2018 godu [Report on climate features in the Russian Federation in 2018]. 2019. Moscow, 79 p. Available at: http://www.meteorf.ru/upload/pdf_download/o-klimate-rf-2018.pdf.

Kaznacheeva V.D., Rudenkova T.V. 1985. Organizaciya tekushchih aerologicheskih dannyh na magnitnyh lentah [Organization of current upper-air data on magnetic tapes]. *Trudy VNIIGMI-MCD – Proceedings of RIHMI-WDC,* vol. 115, pp. 91-108.

Lavrov A.S., Hohlova A.V., Sterin A.M. 2017. Monitoring klimaticheskih parametrov temperatury i vetra v svobodnoj atmosfere: tekhnologicheskie aspekty [Monitoring of climate parameters of temperature and wind in a free atmosphere: technological aspects]. *Trudy Gidrometcentra Rossii – Proceedings of the hydrometeorological center of Russia*, vol. 366, pp. 98-112.

Hohlova A.V., Timofeev A.A. 2011. Mnogoletnie izmeneniya vetrovogo rezhima v svobodnoj atmosfere na evropejskoj territoriej Rossii [Long-term changes in the wind regime in the free atmosphere on the European territory of Russia]. *Meteorologiya i gidrologiya – Meteorology and hydrology*, no. 4, pp. 21-33.

Allen R.J., Sherwood S.C. 2008. Warming maximum in the tropical upper troposhpere deduced from thermal winds. – Nature Geoscience, vol. 1, pp. 399-403. Available at: https://doi.org/10.1038/ngeo208 (accessed 10 February 2020).

Cheng Ch., Lopes E. et al. 2014. Possible impacts of climate change on wind gusts under downscaled future climate conditions: updated for Canada. – Jour. Climate, pp. 1255-1270. Available at: https://doi.org/10.1175/JCLI-D-13-00020.1 (accessed 10 February 2020).

Hoffmann L., Gunther G. et al. 2019. From ERA-Interim to ERA5: the considerable impact of ECMWF's next-generation reanalysis on Lagrangian transport simulations. – Atmos. Chem. Phys., vol. 19, pp. 3097-3124. Available at: https://doi.org/10.5194/acp-19-3097-2019 (accessed 10 February 2020).

IPCC 2013. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Stocker T.F., Qin D. et al. – Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 p. Available at: https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/ (accessed 10 February 2020).

Lavrov A.S., Sterin A.M., Khohlova A.V. 2018. Upper-air climate monitoring: data sources, technological aspects, and some results. – IOP Conf., Ser.: Earth Environ. Sci., vol. 211, No. 1. Available at: https://www.researchgate.net/publication/329733290_Upper-air_climate_monitoring_data_sources_technological_aspects_and_some_results (accessed 10 February 2020).

The Global Observing System for Climate: Implementation Needs. 2016. – WMO GCOS Implementation plan, 325 p. Available at: https://unfccc.int/sites/default/files/gcos_ip_10oct2016.pdf (accessed 10 February 2020).

Vautard R., Cattiaux J., Yiou P. 2010. Nothern hemisphere atmospheric stilling partly attributed to an increase in surface roughness. – Nature Geoscience, vol. 3, pp. 756-761.

WMO: Essential Climate Variable (ECV) Factsheet. 2016. – Available at: https://public.wmo.int/en/programmes/global-climate-observing-system/essential-climate-variables. (accessed 10 February 2020).

Zeng Z., Ziegler A.D., Searchinger T. et al. 2019. A reversal in global terrestrial stilling and its implications for wind energy production. – Nat. Clim. Chang., vol. 9, pp. 979-985. Available at: https://doi.org/10.1038/s41558-019-0622-6 (accessed 10 February 2020).