
**ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ
ИССЛЕДОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА**

ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛЯ ВЕТРА В ВЕРХНЕЙ ТРОПОСФЕРЕ КАК ИНДИКАТОРЫ КЛИМАТИЧЕСКОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ

© 2023 г. А. Ф. Нерушев^а, *, К. Н. Вишератин^а, Р. В. Ивангородский^а

^аФедеральное государственное бюджетное учреждение “Научно-производственное объединение “Тайфун”
(НПО “Тайфун”), Обнинск, Россия

*E-mail: nerushev@rpatyphoon.ru

Поступила в редакцию 01.10.2022 г.

Представлены результаты исследования пространственно-временной изменчивости характеристик поля ветра в свободной атмосфере Северного полушария в зоне обзора радиометра SEVIRI европейских геостационарных метеорологических спутников второго поколения Meteosat 8–Meteosat 11 на временном интервале 2007–2021 гг. Отмечено, что максимальные скорости ветра, а также максимальные среднемесячные и сезонные аномалии модуля скорости ветра наблюдаются над Атлантикой. Выявлена особенность временной изменчивости усредненного по площади модуля скорости ветра, состоящая в изменении знака тренда на рубеже 2015–2017 гг. с положительного на отрицательный. При этом положительные линейные тренды на временных отрезках с 2007 г. до точек смены знака тренда над Атлантикой, всей рассматриваемой областью и Евразией, включая Европейскую территорию РФ, значимо отличны от нуля с вероятностью более 95%. А отрицательный тренд значим только над Атлантикой. Отмечена высокая корреляция в области сезонных вариаций скорости ветра с площадью арктического морского льда и температурными характеристиками тропосферы на уровнях 500 и 200 гПа. На основе анализа связи изменчивости скорости ветра с основными климатическими характеристиками и крупномасштабными атмосферными процессами предложена схема влияния ускоряющегося сокращения площади арктического морского льда, связанного с глобальным потеплением, на скорость ветра в свободной атмосфере.

Ключевые слова: ветер, пространственно-временная изменчивость, верхняя тропосфера, геостационарные спутники, спектральный и вейвлетный анализ, климатические изменения

DOI: 10.31857/S0205961423030053, **EDN:** TYNKNX

ВВЕДЕНИЕ

Скорость и направление ветра относятся к числу важнейших климатических параметров в свободной атмосфере, которые согласно рекомендациям ВМО необходимо контролировать периодически и длительное время (<https://space.oscar.wmo.int/>). Одним из эффективных инструментов такого контроля является спутниковая система наблюдений. При этом наибольшую ценность представляют измерения с геостационарных метеорологических спутников, выполняемые с высоким временным (~15 мин) и пространственным (1–3 км) разрешением. В отличие от приземного ветра поле ветра в свободной атмосфере практически не зависит от характера подстилающей поверхности и определяется атмосферными процессами различного пространственно-временного масштаба, в том числе глобальными. В верхней тропосфере присутствуют высотные струйные течения, в которых сосредоточена основная кинетическая энергия атмосферы (Нерушев, 2014). Струйные течения, а также интенсивные тропические и внетропические циклоны в значительной степе-

ни определяют характеристики поля ветра в свободной атмосфере и их изменчивость. Изучение особенностей изменчивости поля ветра в верхней тропосфере, их связи с другими климатическими параметрами и крупномасштабными процессами позволит глубже понять закономерности климатической изменчивости и улучшить ее прогнозирование.

Исследованию высотных струйных течений на основе использования данных реанализа или спутниковых измерений, а также теоретическому моделированию реакции струи на внешние воздействия той или иной природы, в последнее время посвящен ряд статей как в российских, так и в зарубежных изданиях (см., например, работы (Золотов и др., 2018; Нерушев и др., 2017; Нерушев и др., 2018; Baker et al., 2017; Hall et al., 2017) и библиографию в них). Краткий обзор основных зарубежных работ по этой тематике приведен в статье (Нерушев и др., 2018). Главные выводы, которые можно сделать на основе анализа этих работ, заключаются в следующем (Нерушев и др., 2021): а) реакция струйного течения на антропо-

генное изменение климата является многогранной, с участием сложных взаимодействий между различными системами; б) скорость и широтное положение струи проявляют различную чувствительность к термическому форсингу: широтное положение струи наиболее чувствительно в умеренных и полярных широтах, а скорости струи — в субтропиках и тропиках; в) выявлен сдвиг среднего положения струи в Северном и Южном полушариях к полюсу и ослабление ее скорости; г) выявлен ряд потенциальных предикторов изменчивости высотного струйного течения в летний период.

В наших последних работах по этой проблематике (Нерушев и др., 2017; Нерушев и др., 2018) выявлены общие закономерности и существенные различия межгодовой изменчивости основных характеристик струйных течений в Северном и Южном полушариях; проведено детальное исследование периодических колебаний характеристик струйных течений, выявлены значимые колебания с периодами в несколько десятков суток и месяцев, а также исследована связь характеристик струйных течений с температурой тропосферы, площадью морского льда и крупномасштабными атмосферными явлениями. В работе (Нерушев и др., 2021) построена статистическая модель временной изменчивости характеристик высотных струйных течений Северного полушария за период 2007–2019 гг. Показано, что наибольший вклад в вариации характеристик струйных течений вносят площадь морского льда и группа предикторов, связанных с вариациями температуры тропосферы. Максимальный вклад индексов крупномасштабных атмосферных процессов в качество модели не превышает 10%. В целом модель множественной линейной регрессии позволяет описать до 50–70% изменчивости средней площади, максимальной скорости и широтного положения центра струйного течения.

Значительно меньше работ посвящено изменчивости поля ветра, особенно в свободной атмосфере, и ее связи с климатическими параметрами. Большая часть работ, выполненных за рубежом по этой тематике, касается потенциального воздействия изменения климата на порывы ветра, что представляет несомненный интерес для многих секторов экономики, особенно для ветроэнергетики, а также для повышения адаптивной способности инфраструктуры в условиях риска воздействия экстремальных погодных явлений (см., например, работы (Cheng et al., 2014, Zeng et al., 2019) и обширную библиографию в них).

Нет полной ясности относительно тенденций изменения скорости ветра как в свободной атмосфере, так и в нижнем ее слое. В работе (Булыгина и др., 2013) по данным густой сети метеорологических станций показано, что при наличии не-

которых региональных особенностей на территории России в целом в последние десятилетия преобладает уменьшение скорости ветра. В работе (Лавров, Хохлова, 2020) на основе архива ВНИИГМИ-МЦД многолетних радиозондовых измерений и данных реанализа пятого поколения ERA5 (Hoffman et al., 2019) рассмотрены тенденции изменчивости ветрового режима свободной атмосферы за период 1985–2018 гг. Отмечено, что в разных регионах Северного полушария они имели разнонаправленный знак. Наибольшие по абсолютной величине тренды наблюдаются зимой. Отрицательные тренды скорости ветра в тропосфере преобладают на широтах севернее 55° с.ш., причем над Россией они статистически значимы. 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 за 10 лет. Информация о полях ветра в атмосфере содержится также в ежегодных докладах об особенностях климата на территории Российской Федерации, выпускаемых Росгидрометом (см., например, (Доклад, 2022) и более ранние доклады на сайте ИГКЭ <http://climatechange.igce.ru/>). В них отмечается устойчивая тенденция уменьшения скорости приземного ветра за период 1976–2021 гг. как на всей территории РФ, так и во всех квази-однородных регионах.

Глобальное снижение скорости ветра у поверхности земли примерно на 8% наблюдалось с 1980 по 2010 г., что вызвало обеспокоенность по поводу будущей выработки ветровой энергии (McVicar et al., 2012, Tian et al., 2019). В то же время более тщательные исследования, объединяющие прямые наблюдения скорости ветра на наземных метеостанциях с 1978 по 2017 г. со статистическими моделями для выявления тенденций, обнаружили рост средней глобальной скорости приземного ветра после 2010 года. При этом величина тренда возрастания скорости ветра после 2010 г. в 3 раза превысила величину ее убывания до 2010 г. (Zeng et al., 2019).

В докладе Рабочей группы I к Шестому отчету Межправительственной группы экспертов по изменению климата (IPCC) (<https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-working-group-i/>) констатируется, что тенденции изменения средней скорости поверхностного ветра присутствуют во многих районах. Однако выделение этих тенденций из межгодовой естественной изменчивости и их приписывание антропогенному изменению климата обладает низкой степенью достоверности из-за различных факторов. Поэтому можно заключить, что их связь с изменением климата в настоящее время однозначно не установлена (https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_Chapter_12.pdf).

Что касается ветра в свободной атмосфере, то результаты многочисленных работ, использующих данные реанализов, а также радиозондовые данные свидетельствуют о последовательном сдвиге тропосферных внетропических струйных течений в сторону полюсов с 1979 года (Allen et al., 2012; Davis and Birner, 2013; Davis and Rosenlof, 2012; Manney and Hegglin, 2018; Pena-Ortiz et al., 2013). При этом скорость субтропических струйных ветров обычно увеличивалась зимой и уменьшалась летом, но тенденции зависят от региона (Lee et al., 2019; Manney and Hegglin, 2018; Pena-Ortiz et al., 2013). Общее число внетропических циклонов в северном полушарии с низкой степенью достоверности увеличилось с 1980-х годов, но с меньшим количеством глубоких циклонов, особенно летом (Chang and Yau, 2016; Wang X. L. et al., 2016). Положительные значимые тренды скорости зонального ветра в средней и верхней тропосфере величиной 0.5 м/с за декаду за 30-летний период (1979–2018 гг.) отмечаются в северном полушарии в зимний период. В другие сезоны тренды скорости зонального ветра слабо отрицательные и практически во всей указанной области не значимы (https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_Chapter_2.pdf).

Учитывая то обстоятельство, что скорость ветра в свободной атмосфере зависит от атмосферных процессов, в том числе глобальных, и поэтому отражает роль климатических изменений, представляет интерес, используя в качестве основной информации спутниковые измерения, детально рассмотреть ее временную изменчивость а также связь с важнейшими климатическими параметрами и крупномасштабными процессами. В настоящей статье мы постарались осветить этот вопрос, используя те же подходы, которые применяли при изучении высотных струйных течений.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И ИСПОЛЗУЕМЫЕ МЕТОДЫ

Так же, как в наших предыдущих работах в качестве исходной спутниковой информации используются данные зондирования атмосферы радиометром SEVIRI (Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager) европейских геостационарных метеорологических спутников второго поколения Meteosat 8–Meteosat 11 с временным интервалом 15 мин за период с марта 2007 г. по декабрь 2021 г. включительно, поступавшие по каналам связи из НИЦ “Планета” в НПО “Тайфун”. Нижняя граница временного периода обусловлена имеющимся в НИЦ “Планета” архивом пригодных для обработки данных зондирования атмосферы радиометром SEVIRI. Радиометр обозревает область земного шара ± 70 град по широте и долготе от подспутниковой точки (0 град).

Не останавливаясь на методе расчета поля скорости ветра по перемещению атмосферных трассеров — неоднородностей концентрации водяного пара, детально изложенном в работе (Нерушев, Крамчанинова, 2011), укажем, что вектор скорости горизонтального ветра (V) в верхней тропосфере рассчитывается по данным измерения канала водяного пара радиометра SEVIRI с центром на 6.2 мкм в узлах регулярной сетки $1^\circ \times 1^\circ$ по трем последовательным снимкам, разделенным временным интервалом 15 мин. Этот канал имеет максимум весовой функции на уровне около 350 гПа для атмосферных условий, соответствующих умеренным широтам (приблизительно 8 км), а ее полуширина составляет приблизительно 300 гПа (<http://www.eumetsat.int/>). Выделение желаемого элемента среды с центром в точке (x, y) осуществляется двумерным оператором H (рабочее окно), представляющим собой пространственную весовую функцию и играющим роль фильтра верхних пространственных частот. Процедура отождествления выделенных таким образом областей поля излучения атмосферы, принимаемого радиометром SEVIRI, в моменты времени t_1 и t_2 заключается в нахождении глобальных экстремумов взаимных статистических характеристик (например, структурной функции) путем вариаций пространственных сдвигов. Абсолютная погрешность вычисления модуля горизонтальной скорости ветра разработанным методом не превышает 8 м/с, а азимута скорости — 15–20 град (Нерушев, Крамчанинова, 2011).

Для анализа связи изменчивости скорости ветра с основными климатическими параметрами и крупномасштабными процессами привлекались среднемесячные квазизональные, усредненные по долготной области 70° з.д.– 70° в.д. значения температуры тропосферы (T_p) на разных уровнях по данным реанализа NCEP/NCAR (Kalnay, et al., 1996) и их разности на уровнях 200 и 500 гПа (ΔT_{200} и ΔT_{500}) между низкими (0°) и высокими (80°) широтами; среднемесячные значения площади арктического морского льда (S_{ice}) по данным NOAA (<ftp://sidads.colorado.edu/DATASETS/NOAA/>); различные индексы крупномасштабной атмосферной циркуляции, рассчитанные в Центре прогнозов климата Национального управления по исследованию океана и атмосферы США (<https://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/>).

Непосредственно расчет поля ветра методом, основанным на применении корреляционно-экстремальных алгоритмов (Нерушев, Крамчанинова, 2011), выполняется с помощью библиотеки OpenCV (<https://opencv.org/>). Расчеты повторяются с временным интервалом 1 ч. Данные за месяц в виде массива компонентов векторов скорости ветра сохраняются в формате NetCDF. Для дальнейшего анализа были разработаны про-

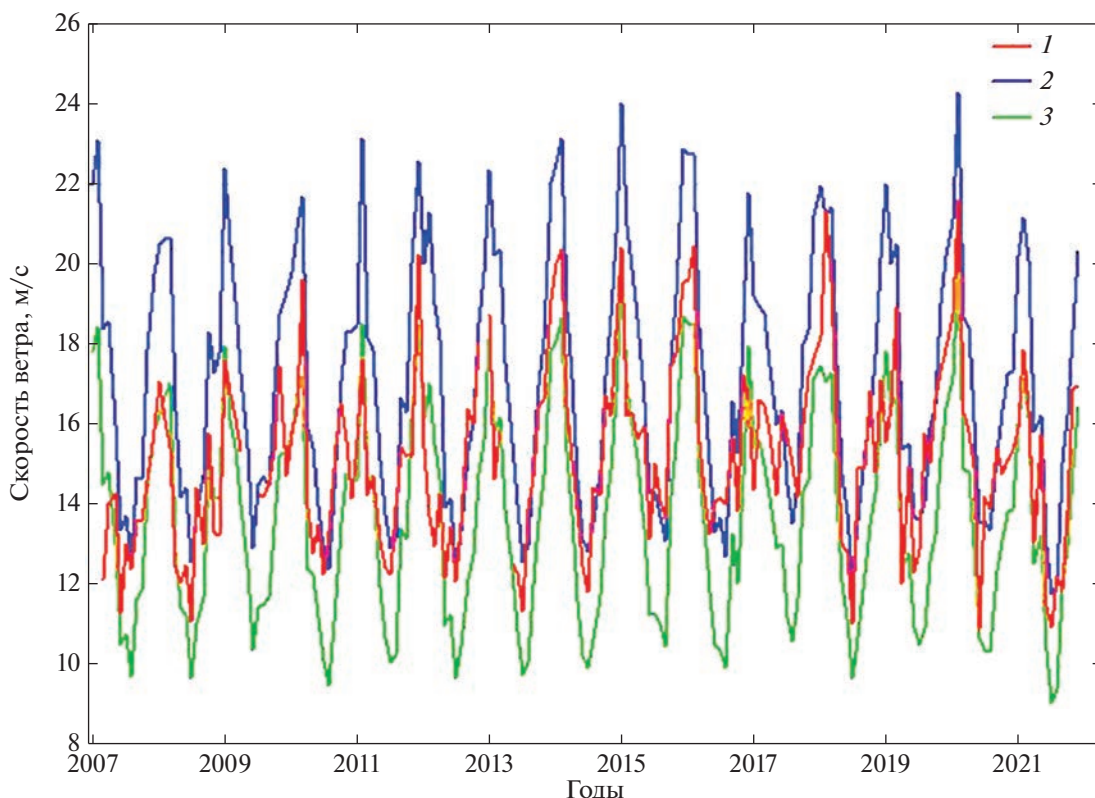


Рис. 1. Межгодовой ход среднемесячных значений скорости ветра V_{cal} (1) и скорости ветра по данным NCEP на уровнях 300 (2) и 400 (3) гПа, усредненных по всей рассматриваемой области.

граммные средства усреднения полей ветра, которые позволяют получать средние за сутки, месяц, сезон или за несколько лет.

Информация о характеристиках поля ветра в свободной атмосфере на основе спутниковых данных представляется в виде карт в прямоугольной проекции с координатами (30–60)° с.ш., 60° з.д.–60° в.д. с выделением 3-х областей: Атлантики (60° з.д.–15° з.д.), Западной и Восточной Европы (15° з.д.–30° в.д.), Евразии (30° в.д.–60° в.д.), включая Европейскую территорию Российской федерации (ЕТР). Ограничение по долготе (60° з.д.–60° в.д.) и сверху по широте (60° с.ш.) обусловлено размерами видимой с высоты геостационарной орбиты спутника (36 тыс. км) области Земного шара. Рассчитанные значения V на краях области с координатами более 60° по широте и долготе отягощены большими погрешностями, и в силу этого исключаются из рассмотрения. Ограничение снизу по широте (30° с.ш.) выбрано с точки зрения охвата области Атлантики, через которую проходят траектории внетропических циклонов.

Важное значение для точности расчетов имеет выбор рабочего окна и области сканирования (Нерушев, Крамчанинова, 2011). Как показали численные эксперименты наиболее оптимальны-

ми величинами с точки зрения точности расчетов и времени счета является квадратное рабочее окно, размером 64 × 64 пикселей и соответствующая область сканирования 128 × 128 пикселей. На рис. 1 представлено сравнение временного хода рассчитанных значений скорости ветра V_{cal} , усредненной по всей рассматриваемой области со значениями V для той же области на уровнях 300 (V_{300}) и 400 (V_{400}) гПа по данным NCEP Daily Global Analyses (<https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.ncep.html>).

Как следует из рис. 1, значения V_{cal} располагаются между значениями V_{300} и V_{400} и достаточно хорошо воспроизводят временные особенности изменчивости последних, что естественно, поскольку, как указано выше, максимум весовой функции канала 6.2 мкм радиометра SEVIRI находится на уровне около 350 гПа для атмосферных условий, соответствующих умеренным широтам. Коэффициент корреляции для обоих случаев значим на уровне 0.95 и достаточно высок (0.82). Среднеарифметическое отклонение разности ($V_{cal} - V_{300}$) равно минус 1.92 м/с, а среднеквадратическое отклонение (СКО) — 1.80 м/с. Для разности ($V_{cal} - V_{400}$) эти значения равны, соответственно, 1.50 и 1.51 м/с. Наибольшее по модулю значение среднеарифметического откло-

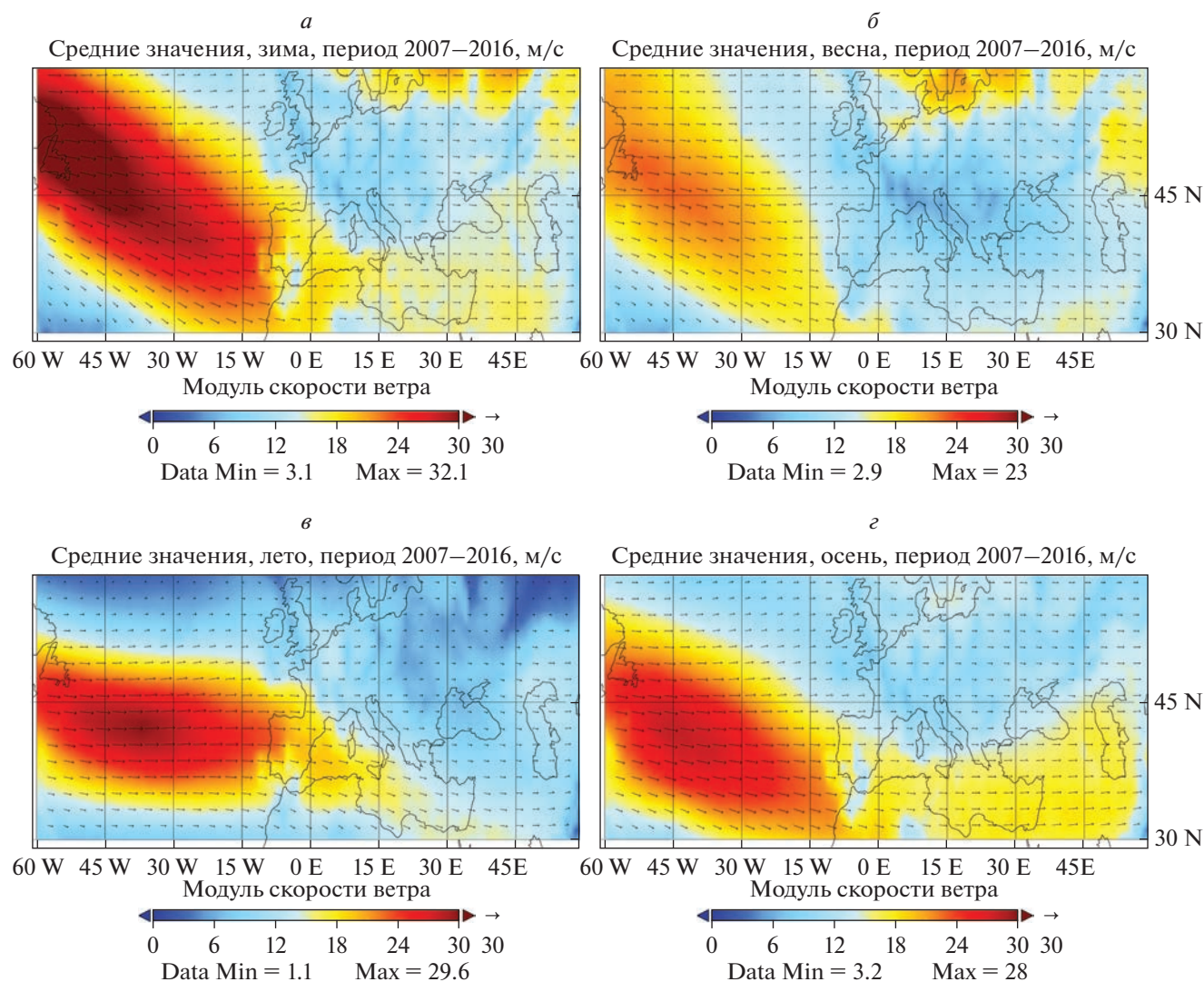


Рис. 2. Средние многолетние значения скорости и направления ветра для четырех сезонов.

нения (-4.27 м/с) отмечается для разности ($V_{cal} - V_{300}$) над Евразией, при этом СКО равно 2.22 м/с.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Общие закономерности пространственно-временной изменчивости скорости ветра за 2007–2016 гг.

Рассмотрим вначале общие закономерности пространственно-временной изменчивости скорости ветра на примере средних многолетних сезонных полей ветра в трех упомянутых выше выделенных областях (рис. 2). В дальнейшем средние многолетние (сезонные и среднемесячные) значения скорости ветра за период 2007–2016 гг. будем использовать в качестве соответствующих норм. Как и следовало ожидать, общее направление ветра — с запада на восток с некоторым от-

клонением к югу в основном над Атлантикой. Наибольшие значения скорости ветра отмечаются над Атлантикой ($60-15^\circ$ з.д. Это связано, по-видимому, с тем, что именно над Атлантикой отмечаются высотные струйные течения (Нерушев и др., 2017), а также проходят траектории большинства внетропических циклонов, оказывающих влияние и на верхнюю тропосферу.

На рис. 3 представлен годовой ход средних многолетних среднемесячных значений скорости ветра за период 2007–2016 гг. для каждой из выделенных областей. С целью удобства восприятия 95-процентный доверительный интервал указан только для всей области. Видно, что максимальные скорости ветра в каждой из выделенных областей и во всей области наблюдаются в зимний период (в январе-феврале), а минимальные — летом (в июне-июле). Скорости ветра в целом уменьшаются от Атлантики к Евразии. Это мож-

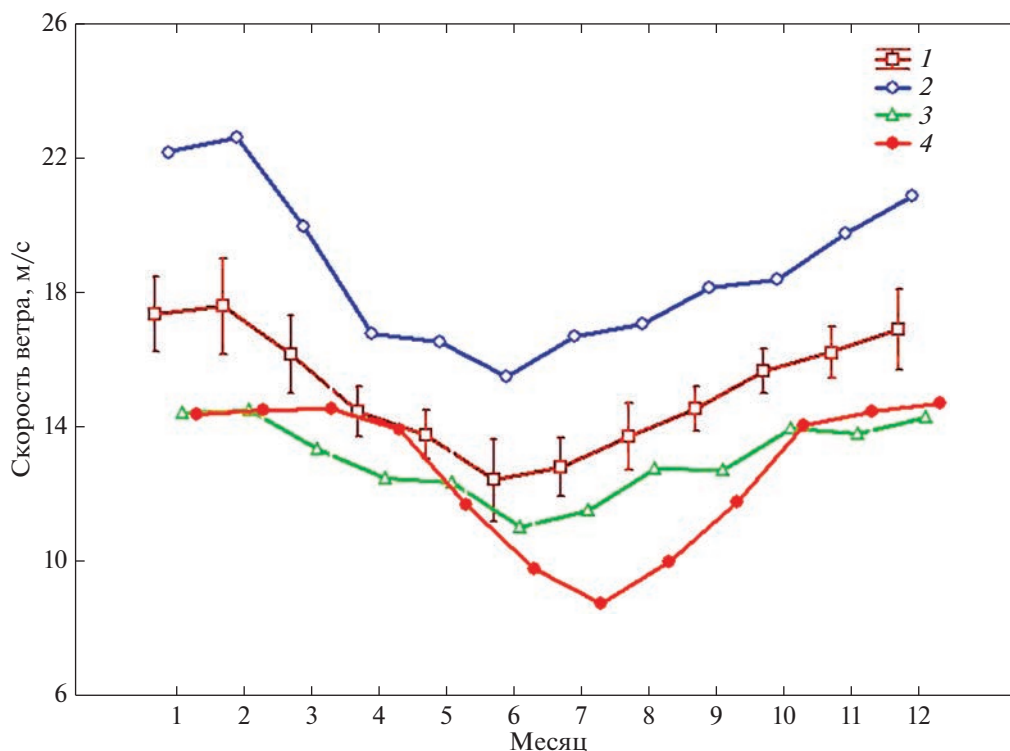


Рис. 3. Годовой ход средних многолетних среднемесячных значений скорости ветра, усредненной по площади всей области (1), Атлантики (2), Европы (3), Евразии (4).

но объяснить тем, что влияние высотных струйных течений, а также внетропических циклонов существенно ослабевает над Европой и Евразией. Значения скорости над Атлантикой и Евразией отличаются приблизительно в 1.2–1.9 раза.

Среднемесячные и сезонные аномалии скорости ветра в 2017–2021 гг.

Как сказано выше в качестве нормы при расчете среднемесячных и сезонных аномалий модуля и направления скорости ветра использованы средние многолетние значения полей ветра за период 2007–2016 гг. На рис. 4 в качестве примера приведены сезонные аномалии модуля и направления скорости ветра для зимы и лета 2020 г. и среднемесячные аномалии для января и июля 2020 г. Здесь и далее черным цветом изображены векторы скорости ветра для конкретного месяца или сезона, а фиолетовым — векторы нормы.

Приведенные примеры показывают довольно сложное пространственное распределение аномалий модуля скорости ветра. Анализ сезонных аномалий скорости ветра в 2017–2021 гг. показывает, что большая часть как положительных, так и отрицательных аномалий располагается над Атлантикой, а максимальные по модулю положительные и отрицательные аномалии отмечаются зимой. Обращает на себя внимание большая по-

ложительная аномалия V в январе 2020 г. в области (10–15) град з.д., (30–35) град с.ш., достигающая 20 м/с. Указанное обстоятельство отмечено и в обзоре Гидрометцентра РФ “Основные особенности атмосферной циркуляции и погоды в северном полушарии в январе 2020 г.” (https://meteoinfo.ru/?option=com_content&view=article&id=16776), в котором выделяются большие положительные аномалии геопотенциала на уровне 500 гПа величиной до 15 дам (15 декаметров) вблизи указанной области. В обзоре отмечено, что зональный перенос в средней тропосфере был значительно интенсивнее обычного: даже осредненный по полушарию индекс зональной циркуляции оказался на 25% выше нормы.

Над ЕТР присутствуют слабые положительные и отрицательные сезонные аномалии, величина которых, как правило, не выходит за пределы ± 1.5 м/с. Это согласуется с информацией, помещенной в Докладах об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2017–2020 гг.

Среднемесячные аномалии модуля скорости ветра заметно больше сезонных. Что касается различия направления векторов ветра, оно, как следует из рис. 3, для сезонных аномалий значительно меньше, чем для среднемесячных. Для последних это различие в ряде случаев может достигать 90 град.

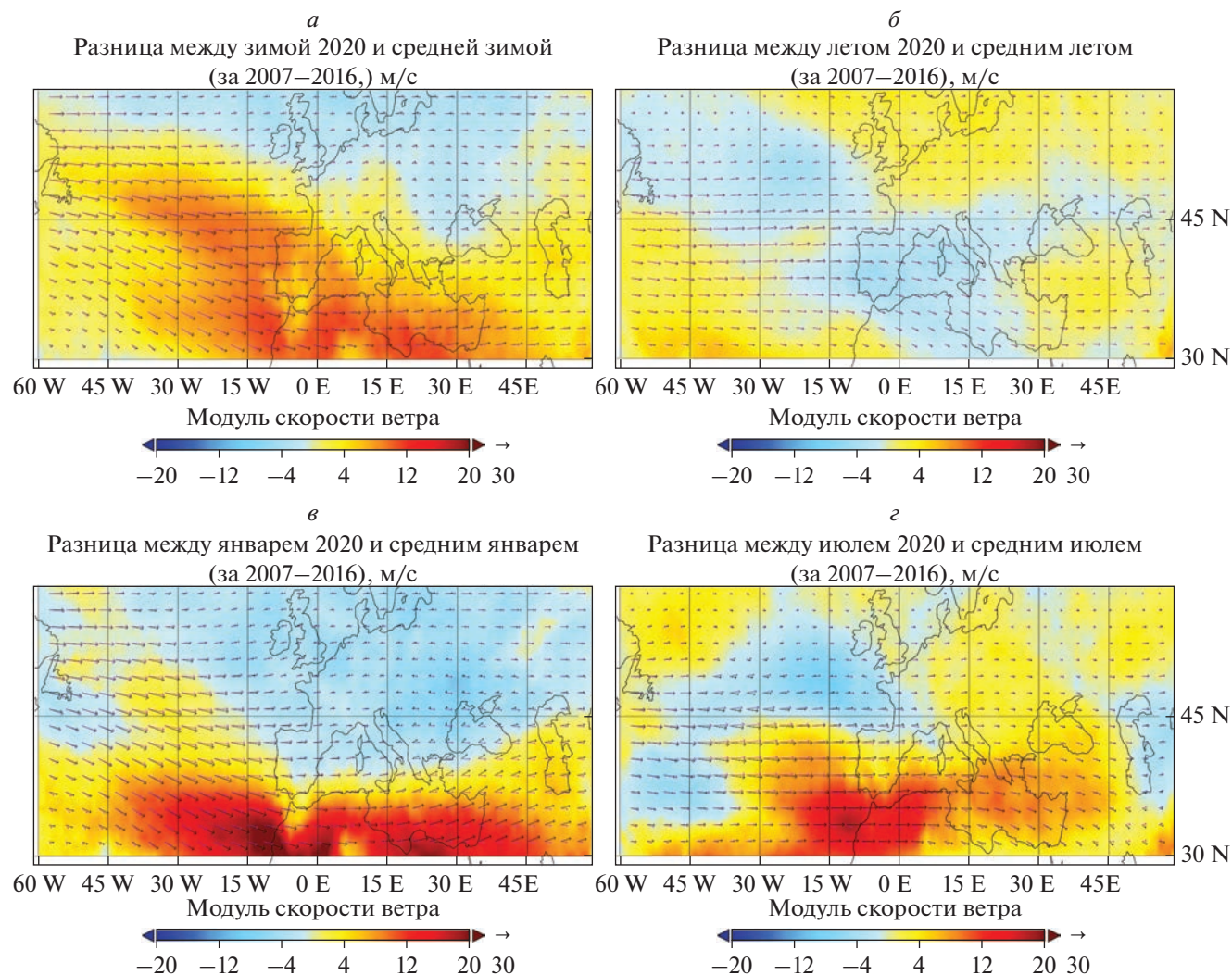


Рис. 4 Аномалии модуля и направления вектора скорости ветра для зимы (а) и лета (б) 2020 года, января (в) и июля (г) 2020 года.

Особенности временной изменчивости скорости ветра на временном интервале 2007–2021 гг.

Рассмотрим временную изменчивость модуля среднемесячной скорости ветра на интервале 2007–2021 гг., усредненному по широтной зоне (30–60)° и по долготе в каждой области. На рис. 5 представлены вариации скорости ветра в каждой из выделенных областей и ее аппроксимации полиномами 2-й степени.

Как видно из рис. 5 рост модуля скорости ветра в 2015–2017 гг. сменяется его падением. Точка смены знака тренда определялась по положению экстремума полиномов 2-й степени. Над Европой такая смена произошла в середине 2015 г., над Евразией — в середине 2017 г., а над Атлантикой и всей областью в целом — в начале 2016 г. Наибольшие положительные тренды, значимо отличные от нуля с вероятностью более 95%, отмечаются

над Атлантикой (0.42 м/с/год) и всей областью в целом (0.28 м/с/год). Значимый положительный тренд (0.18 м/с/год) отмечается и над Евразией. Отрицательный тренд (–0.46 м/с/год) значим только над Атлантикой.

Как показал анализ, использование полиномов более высокой степени практически не улучшает точности аппроксимации: так среднеквадратическое отклонение рассчитанных значений скорости ветра от аппроксимирующей кривой для полиномов 2-й степени не превышает 3.07 м/с, а для полиномов 3-й и 5-й степеней — 3.03 м/с. В пользу выбора полиномов 2-й степени служит то обстоятельство, что они позволяют более наглядно определить время смены знака тренда с положительного на отрицательный. Использование полиномов более высокой степени несколько сдвигает точку смены знака тренда в правую сто-

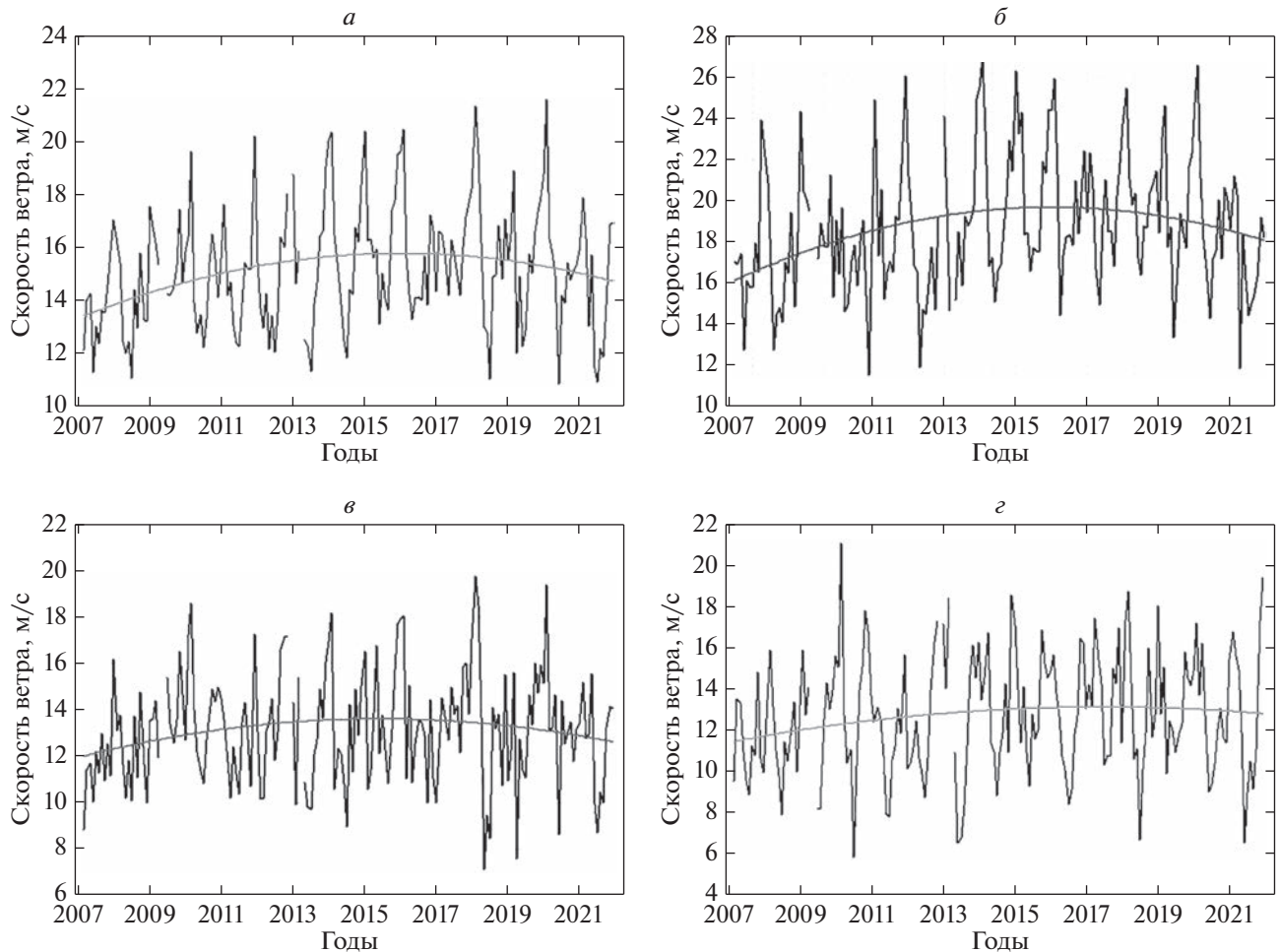


Рис. 5. Временные ряды усредненных по площади среднемесячных значений скорости ветра над всей областью (а), Атлантикой (б), Западной и Восточной Европой (в), Евразией (г) и их аппроксимации полиномами 2-й степени.

рону, но в пределах временного отрезка 2015–2017 гг. Различное время смены знака тренда над выделенными областями может быть связано, с нашей точки зрения, с преобладающим влиянием в каждой области того или иного воздействующего фактора (штормовые треки, струйные течения и др.)

Качественно аналогичная картина временной изменчивости скорости ветра — изменение знака тренда с положительного на отрицательный над Атлантикой и всей областью в целом — проявляется и по данным NCEP Daily Global Analyses (<https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.ncep.html>).

С чем связано такое поведение модуля скорости ветра? Известно (Нерушев и др., 2018), что климатическая изменчивость динамических характеристик верхней тропосферы в Северном полушарии определяется такими важнейшими климатическими параметрами, как температура тропосферы и площадь арктического морского льда. Кроме того, на нее могут оказывать влияние

крупномасштабные процессы: NAO (Северо-Атлантическое колебание — вариации поля геопотенциала изобарической поверхности 500 гПа для внетропической зоны Северного полушария); АО (Арктическое колебание — аномалии поверхности 1000 гПа для Северного полушария севернее 20°); EAWR (East Atlantic/Western Russia, Восточно-Атлантический — Западно-Российский циркуляционный индекс — вариации поля геопотенциала 500 гПа севернее 20° для региона Атлантика — Западная Сибирь); QBO30 и QBO50 (квазидвухлетние вариации экваториального ветра на уровнях 30 и 50 гПа); SOI (индекс Южного колебания — разность аномалий давления над Таити и над Дарвином). Рассмотрим связь среднемесячных значений скорости ветра с указанными характеристиками.

Анализ спектральной структуры показал, что в амплитудных спектрах скоростей ветра и климатических характеристик четко выделяется годовая гармоника. Кроме того, в спектрах скоростей

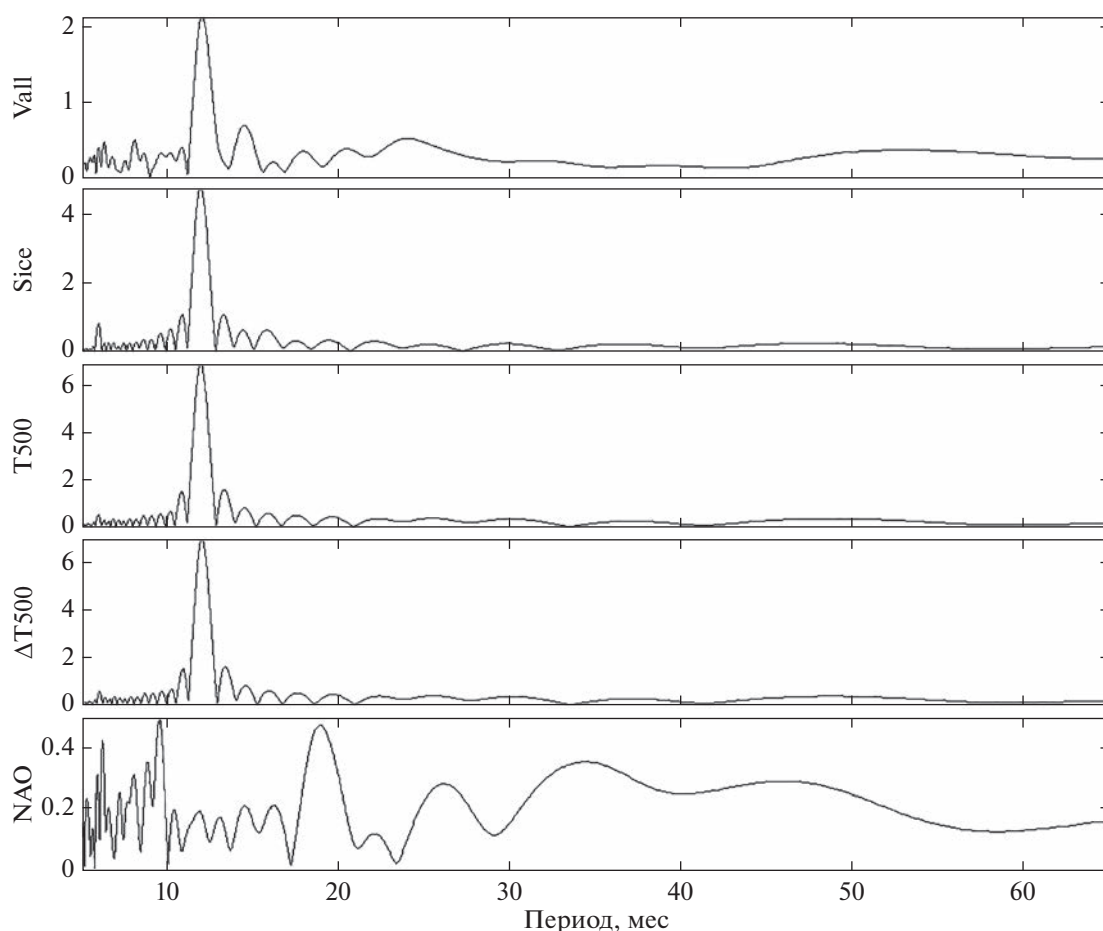


Рис. 6. Амплитудные спектры скорости ветра, важнейших климатических характеристик и индекса NAO. По оси ординат — амплитуда колебаний.

ветра проявляются колебания в интервале 20–50 мес. Для климатических индексов годовая гармоника практически отсутствует, но четко проявляются колебания в области периодов 20–40 мес. На рис. 6 в качестве примера приведены спектры модуля скорости ветра для всей рассматриваемой области (V_{all}), площади арктического морского льда (S_{ice}), температуры тропосферы на уровне 500 гПа ($T500$) в широтной зоне 40–50 град., разности температур между низкими (0°) и высокими (80°) широтами на уровне 500 гПа ($\Delta T500$) и индекса Северо-Атлантического колебания (NAO).

Исходя из такого вида спектральных характеристик можно ожидать корреляционной связи скорости ветра прежде всего с климатическими характеристиками в области сезонных вариаций.

На рис. 7 для примера на верхних графиках приведен временной ход стандартизованных среднемесячных значений скорости ветра, усредненной по всей рассматриваемой области, важнейших климатических характеристик ($T500$, $\Delta T500$, S_{ice}) и одного из климатических индексов —

NAO. $Astd = (X - M)/STD$, где X — соответствующая характеристика, M и STD — ее среднее значение и стандартное отклонение на временном интервале 2007–2021 гг.. На нижних графиках представлены результаты кросс-корреляционного вейвлетного анализа. Направление стрелок вправо указывает на совпадение фаз, влево — на противофазность колебаний. Цветовая шкала дана в условных единицах. Жирная линия ограничивает области, где значимость корреляции отлична от нуля с вероятностью 0.95. Заметим, что аналогичная картина характерна и для связи V_{all} с $T200$ и $\Delta T200$.

Анализ показывает, что наибольшая связь полей ветра в каждой области наблюдается с температурными характеристиками атмосферы и площадью морского льда. При этом асинхронные годовые колебания V наблюдаются с $T500$ (рис. 7а), синхронные — с $\Delta T500$ и S_{ice} (рис. 7б, 7в). Что касается связи V с индексами крупномасштабных процессов, то влияние NAO слабо проявляется

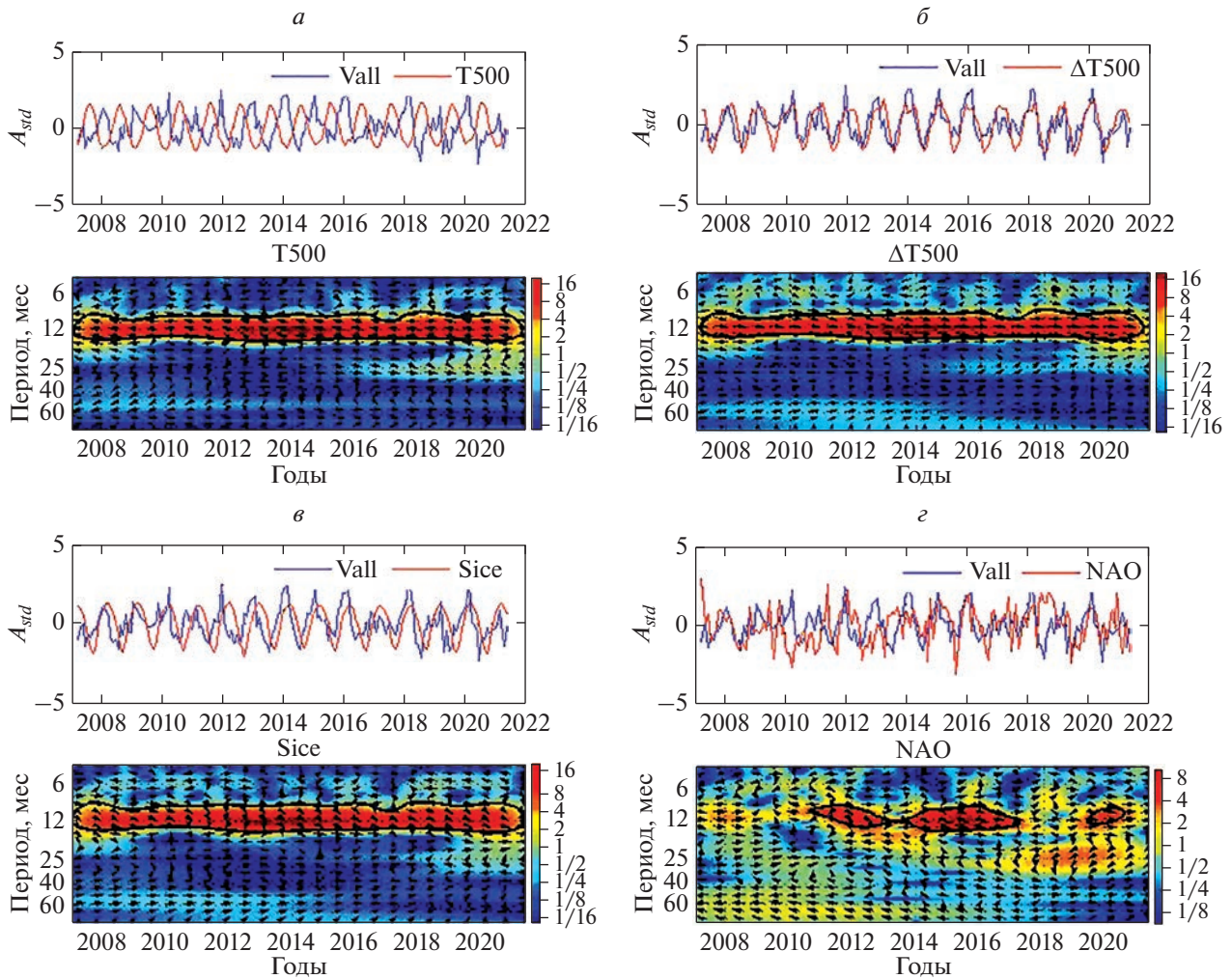


Рис. 7. Кросс-корреляционный вейвлетный анализ скорости ветра Vall с важными климатическими характеристиками (а–в) и климатическим индексом NAO (г). Пояснения даны в тексте.

лишь в отдельные годы, то же касается и других климатических индексов.

Интересные особенности выявляются при сравнении временного хода климатических характеристик и скорости ветра. На рис. 8 приведено сопоставление стандартизованных среднемесячных значений S_{ice} , $\Delta T500$ и Vall на временном интервале 2007–2021 гг.

Минимальные значения S_{ice} , наблюдаемые строго в сентябре, отстают от минимальных значений $\Delta T500$ на 2 мес. Разница по фазе максимальных значений этих характеристик выражена слабее в силу более сложной структуры временной зависимости $\Delta T500$ вблизи максимальных значений. Временные вариации Vall в основном совпадают по фазе с вариациями $\Delta T500$, что особенно четко проявляется в годовых колебаниях (рис. 7б), и поэтому также опережают по фазе вариации S_{ice} . Отметим, что подобная особенность

характерна и для другой важной динамической характеристики атмосферы – высотных струйных течений. В Северном полушарии годовые вариации средней площади струйного течения опережают вариации S_{ice} примерно на 1.5–2.5 мес. (Нерушев и др., 2018). Простое объяснение указанной особенности может быть следующим. Минимальные значения $\Delta T500$ обусловлены в основном максимальными значениями температуры атмосферы в высоких широтах (в наших расчетах в широтной зоне 70° – 80°), которые достигаются в июле. Арктический морской лед как инерционная система, запасая поглощенную энергию солнца, продолжает таять еще в течение 2-х мес., после чего начинается рост его площади. Движения в атмосфере, как значительно менее инерционной системе, практически следуют во времени за изменением температуры.

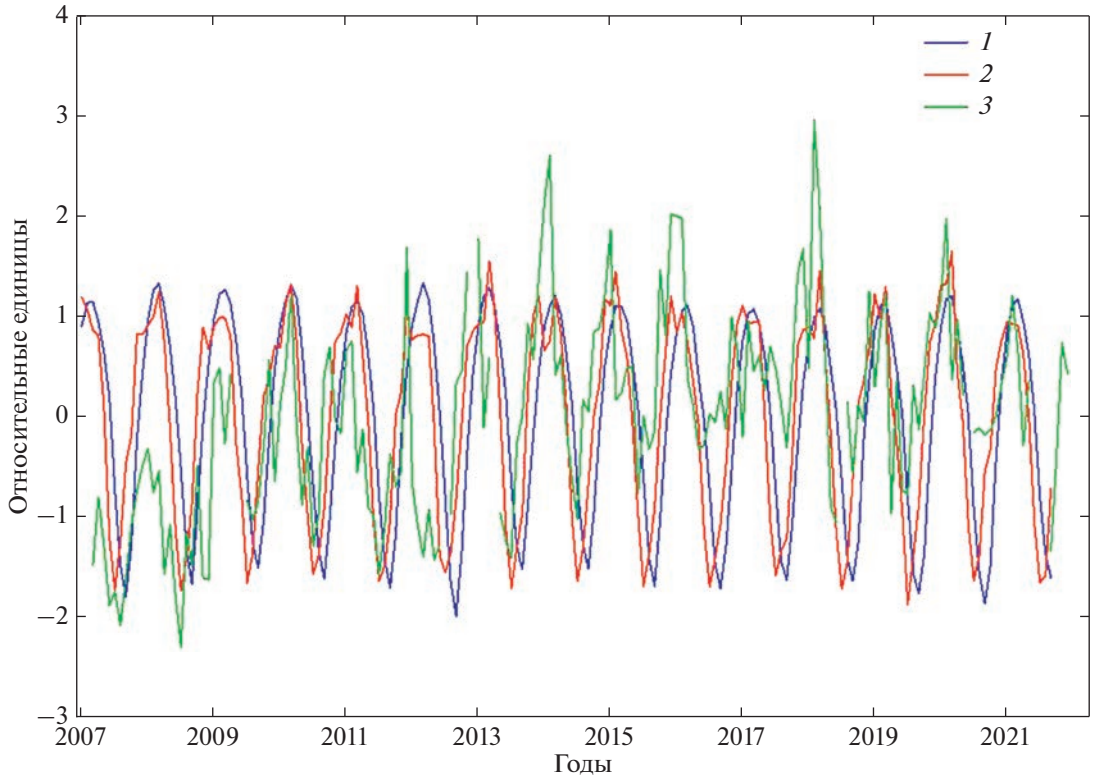


Рис. 8. Временной ход стандартизованных значений площади Арктического морского льда (1), разности температур между низкими (0°) и высокими (80°) широтами на уровне 500 гПа (2) и модуля скорости ветра для всей рассматриваемой области (3).

Сравним изменчивость скорости ветра и основных климатических характеристик на разных временных интервалах (табл. 1).

Как видно из таблицы, в последние годы наблюдается существенное увеличение абсолютной величины отрицательных трендов S_{ice} и ΔT_{500} . В силу сказанного можем заключить, что причиной уменьшения скорости ветра в свободной ат-

мосфере является ускоряющееся в последние годы сокращение площади арктического морского льда, связанное с глобальным потеплением, и вызванное им уменьшение ΔT тропосферы между низкими и высокими широтами. Цепочка связей влияния изменения площади морского льда и температуры на скорость ветра в тропосфере схематически может быть представлена следующим образом (рис. 9).

Таблица 1. Величины линейных трендов среднемесячных значений площади арктического морского льда, температурных характеристик тропосферы, а также скорости ветра в свободной атмосфере над Атлантикой на разных временных интервалах. Жирным шрифтом выделены тренды, значимо отличные от нуля с вероятностью 0.95

Характеристика (размерность тренда)	Временной интервал		
	1990–2021	2007–2021	2017–2021
S_{ice} (млн км ² /год)	–0.067	–0.07	–0.30
ΔT_{500_0-80} (град/год)	–0.029	–0.07	–0.48
$T_{500_0_10}$ (град/год)	0.018	0.026	0.036
$T_{500_70_80}$ (град/год)	0.047	0.095	0.52
V_{Atl} (м/с/год)		0.13	–0.56

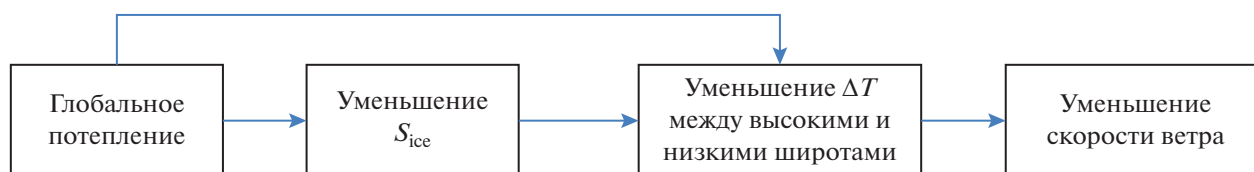


Рис. 9. Схема цепочки связей влияния изменения площади морского льда и температуры на скорость ветра в тропосфере.

Существенно более быстрое потепление в Арктике по сравнению с Северным полушарием или глобальным средним, получившее название Арктическое усиление (Arctic amplification), очевидно, должно влиять и на климат средних широт. В 6-м отчете IPCC (<https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-working-group-i/>) выделяются (с низкой степенью достоверности) 4 механизма потенциального влияния Арктики на климат средних широт: 1) ослабление и повышенная изменчивость полярного вихря; 2) изменение (смещение к экватору) штормовых треков; 3) усиление и стационарирование планетарных волн; 4) меняющееся положение струйных течений. Первые 3 механизма действуют в основном зимой, 2-й–4-й – летом. Приведенные выше данные уточняют, по нашему мнению, влияние Арктического усиления на один из важных климатических параметров – скорость ветра в верхней тропосфере. Для детального описания механизмов такого влияния требуются дополнительные исследования. Здесь же мы изложили наши представления, подкрепленные данными наблюдений и расчетов, о наиболее вероятной связи между этими характеристиками.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование данных зондирования атмосферы радиометром SEVIRI европейских геостационарных метеорологических спутников второго поколения позволило исследовать пространственно-временную изменчивость скорости ветра в свободной атмосфере Северного полушария в зоне обзора спутников за период 2007–2021 гг. и ее связь с основными климатическими параметрами и крупномасштабными атмосферными процессами. Основные выводы, вытекающие из проведенного исследования, могут быть сформулированы следующим образом.

1. Максимальные скорости ветра, а также максимальные среднемесячные и сезонные аномалии модуля скорости ветра отмечаются над Атлантикой.

2. Выявлена особенность временной изменчивости модуля скорости ветра на интервале 2007–2021 гг., усредненного по площади каждой из рассмотренных областей, состоящая в изменении

знака тренда на рубеже 2015–2017 гг. с положительного на отрицательный. Наибольшие положительные тренды, значимо отличные от нуля с вероятностью более 95%, отмечаются над Атлантикой (0.42 м/с/год) и всей областью в целом (0.28 м/с/год). Значимый положительный тренд (0.18 м/с/год) отмечается и над Евразией. Отрицательный тренд (–0.46 м/с/год) значим только над Атлантикой.

3. Отмечена высокая корреляция в области сезонных вариаций скорости ветра с площадью арктического морского льда и температурными характеристиками тропосферы на уровнях 500 и 200 гПа, прежде всего с разностью температур между низкими и высокими широтами.

4. На основе анализа связи изменчивости скорости ветра с основными климатическими характеристиками и крупномасштабными атмосферными процессами предложена схема влияния ускоряющегося сокращения площади арктического морского льда, связанного с глобальным потеплением, на скорость ветра в свободной атмосфере.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Булыгина О.Н., Коршунова Н.Н., Разуваев В.Н. Изменение режима ветра на территории России в последние десятилетия // Труды ГГО. Санкт-Петербург. 2013. Вып. 568. С. 156–172.
- Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2021 год. М.: Росгидромет, 2022. 104 с.
- Золотов С.Ю., Ипполитов И.И., Логинов С.В., Харюткина Е.В. Изменчивость субтропического струйного течения южного полушария во второй половине XX и начале XXI в. // Изв. РАН ФАО. 2018. Т. 54. № 5. С. 505–515.
- Лавров А.С., Хохлова А.В. Климатический мониторинг ветра в свободной атмосфере северного полушария: многолетние характеристики и тенденции изменчивости // Фундаментальная и прикладная климатология. 2020. № 2. С. 58–75.
- Нерушев А.Ф., Вишератин К.Н., Ивангородский Р.В. Пространственно-временная изменчивость высотных струйных течений по данным спутниковых измерений // Исслед. Земли из космоса. 2017. № 6. С. 31–45.
- Нерушев А.Ф., Вишератин К.Н., Ивангородский Р.В. Динамика высотных струйных течений по данным спут-

- никовых измерений и их связь с климатическими параметрами и крупномасштабными атмосферными явлениями // Исслед. Земли из космоса. 2018. № 6. С. 24–38.
- Нерушев А.Ф., Вишератин К.Н., Ивангородский Р.В. Статистическая модель временной изменчивости характеристик высотных струйных течений северного полушария на основе спутниковых измерений // Изв. РАН ФАО. 2021. Т. 57. № 4. С. 401–413.
- Нерушев А.Ф., Крамчанинова Е.К. Метод определения характеристик атмосферных движений по данным измерений метеорологических геостационарных спутников // Исслед. Земли из космоса. 2011. № 1. С. 3–13.
- Allen R.J., Sherwood S.C., Norris J.R., Zender C.S. Recent Northern Hemisphere tropical expansion primarily driven by black carbon and tropospheric ozone // Nature. 2012. V. 485. P. 350–354.
- Baker H.S., Woollings T., Mbengue C. Eddy-driven jet sensitivity to diabatic heating in an idealized GCM // J. Climate. 2017. V. 30. № 16. P. 6413–6431.
- Cheng Ch., Lopes E. Possible impacts of climate change on wind gusts under downscaled future climate conditions: updated for Canada // Journal of Climate. 2014. P. 1255–1270. Available at: <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-13-00020.1>
- Chang E.K.M., Yau A.M.W. Northern Hemisphere winter storm track trends since 1959 derived from multiple reanalysis datasets // Climate Dynamics. 2016. V. 47(5–6). P. 1435–1454. <https://doi.org/10.1007/s00382-015-2911-8>
- Coumou D., Petoukhov V., Rahmstorf S., Petri S., Schellnhuber H.J. Quasi-resonant circulation regimes and hemispheric synchronization of extreme weather in boreal summer // Proceedings of the National Academy of Sciences. 2014. V. 111(34). P. 12331–12336. <https://doi.org/10.1073/pnas.1412797111>
- Davis S.M., Rosenlof K.H. A multi-diagnostic intercomparison of tropical width time series using reanalyses and satellite observations // J. Climate. 2012. V. 25(4). P. 1061–1078. <https://doi.org/10.1175/jcli-d-11-00127.1>
- Davis N.A., Birner T. Seasonal to multi-decadal variability of the width of the tropical belt // J. Geophys. Res. 2013. V. 118(14). P. 7773–7787. <https://doi.org/10.1002/jgrd.50610>
- Haimberger L., Mayer M. Upper air winds [in “State of the Climate in 2017”] // Bull. Amer. Meteor. Soc. 2018. V. 98(8). P. S39–S41. <https://doi.org/10.1175/2017bamsstateoftheclimate.1>
- Hall R., Jones J., Hanna E., Scaife A., Erdélyi R. Drivers and potential predictability of summer time North Atlantic polar front jet variability // Clim. Dyn. 2017. V. 48. P. 3869–3887. <https://doi.org/10.1007/s00382-016-3307-0>
- Hoffmann L., Gunther G. From ERA-Interim to ERA5: the considerable impact of ECMWF’s next-generation reanalysis on Lagrangian transport simulations // Atmos. Chem. Phys. 2019. V. 19. P. 3097–3124. <https://doi.org/10.5194/acp-19-3097-2019>
- Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R., Collins W., Deaven D., Gandin L., Saha S., White G., Woollen J., Chelliah M., Janowiak J., Mo K.C., Wang J., Leetmaa A., Reynolds R., Jenne R., Kung E., Salstein D. The NCEP/NCAR Reanalysis 40-year Project // Bull. Amer. Meteor. Soc. 1996. V. 77. P. 437–471.
- Lee S.H., William P.D., Frame T.A. Increased shear in the North Atlantic upper-level jet stream over the past four decades // Nature. 2019. V. 572. P. 639–643. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1465-z>
- Manney G.L., Hegglin M.I. Seasonal and regional variations of long-term changes in upper-tropospheric jets from reanalyses // J. Clim. 2018. V. 31(1). P. 423–448. <https://doi.org/10.1175/jcli-d-17-0303.1>
- McVicar T.R. Global review and synthesis of trends in observed terrestrial near-surface wind speeds: implications for evaporation // J. Hydrol. 2012. V. 416–417. P. 182–205.
- Pena-Ortiz C., Gallego D., Ribera P., Ordonez P., Alvarez-Castro M.D.C. Observed trends in the global jet stream characteristics during the second half of the 20th century // J. Geophys. Res. Atmosph. 2013. V. 118. P. 2702–2713. <https://doi.org/10.1002/jgrd.50305>
- Tian Q., Huang G., Hu K., Niyogi D. Observed and global climate model based changes in wind power potential over the northern hemisphere during 1979–2016 // Energy. 2019. V. 167. P. 1224–1235.
- Wang X.L., Feng Y., Chan R., Isaac V. Inter-comparison of extra-tropical cyclone activity in nine reanalysis datasets // Atmos. Res. 2016. V. 181. P. 133–153. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2016.06.010>
- Zeng Z., Ziegler A.D., Searchinger T. A reversal in global terrestrial stilling and its implications for wind energy production // Nat. Clim. Chang. 2019. V. 9. P. 979–985. <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0622-6>

Characteristics of the Wind Field in the Upper Troposphere as Indicators of Climatic Variability

A. F. Nerushev¹, K. N. Visheratin¹, and R. V. Ivangorodsky¹

¹Federal State Budgetary Institution “Research and Production Association “Typhoon” (RPA “Typhoon”), Obninsk, Russia

The paper presents the results of a study of spatiotemporal variability of the characteristics of the wind field in the free atmosphere of the Northern Hemisphere in the SEVIRI radiometer field of view of European geostationary meteorological satellites of the second generation Meteosat 8–Meteosat 11 in the time interval 2007–2021. It is noted that the maximum wind speeds, as well as the maximum average monthly and seasonal anomalies of the wind speed module, are observed over the Atlantic. A feature of the temporal variability of the area-averaged wind speed modulus is revealed, which consists in a change in the sign of the trend at the turn of 2015–2017 from positive to negative. At the same time, positive linear trends in the time intervals from

2007 to the points of a change in the sign of the trend over the Atlantic, the entire region under consideration and Eurasia, including the European territory of the Russian Federation, are significantly different from zero with a probability of more than 95%. And the negative trend is significant only over the Atlantic. A high correlation was noted in the area of seasonal wind speed variations with the area of Arctic sea ice and temperature characteristics of the troposphere at levels of 500 and 200 hPa. Based on the analysis of the relationship between wind speed variability and the main climatic characteristics and large-scale atmospheric processes, a scheme is proposed for the effect of the accelerating reduction in the area of Arctic sea ice associated with global warming on wind speed in the free atmosphere.

Keywords: wind, spatiotemporal variability, upper troposphere, geostationary satellites, spectral and wavelet analysis, climate change

REFERENCES

- Allen R.J., Sherwood S.C., Norris J.R., Zender C.S. Recent Northern Hemisphere tropical expansion primarily driven by black carbon and tropospheric ozone // *Nature*. 2012. V. 485. P. 350–354.
- Baker H.S., Woollings T., Mbengue C. Eddy-driven jet sensitivity to diabatic heating in an idealized GCM // *J. Climate*. 2017. V. 30. № 16. P. 6413–6431.
- Bulygina O.N., Korshunova N.N., Razuvaev V.N. Izmeneniya rezhima vetra na territorii Rossii v poslednie desyatiletia [Changes in the wind mode in Russia in recent decades] // *Trudy GGO*. 2013. V. 568. S. 156–172. (In Russian).
- Chang E.K.M., Yau A.M.W. Northern Hemisphere winter storm track trends since 1959 derived from multiple reanalysis datasets // *Climate Dynamics*. 2016. V. 47(5–6). P. 1435–1454.
<https://doi.org/10.1007/s00382-015-2911-8>.
- Cheng Ch., Lopes E. Possible impacts of climate change on wind gusts under downscaled future climate conditions: updated for Canada // *J. Climate*. 2014. P. 1255–1270. Available at:
<https://doi.org/10.1175/JCLI-D-13-00020.1>
- Coumou D., Petoukhov V., Rahmstorf S., Petri S., Schellnhuber H.J. Quasi-resonant circulation regimes and hemispheric synchronization of extreme weather in boreal summer // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2014. V. 111(34). P. 12331–12336.
<https://doi.org/10.1073/pnas.1412797111>
- Davis N.A., Birner T. Seasonal to multi-decadal variability of the width of the tropical belt // *J. Geophys. Res.* 2013. V. 118(14). P. 7773–7787.
<https://doi.org/10.1002/jgrd.50610>
- Davis S.M., Rosenlof K.H. A multi-diagnostic intercomparison of tropical width time series using reanalyses and satellite observations // *J. Climate*. 2012. V. 25(4). P. 1061–1078.
<https://doi.org/10.1175/jcli-d-11-00127.1>
- Doklad ob osobennostyakh klimata na territorii Rossiiskoi federatsii za 2021 god. [Report on climate features in the territory of the Russian Federation for 2021] M.: Rosgidromet, 2022. 104 s. (In Russian)
- Haimberger L., Mayer M. Upper air winds [in “State of the Climate in 2017”] // *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 2018. V. 98(8). P. S39–S41.
<https://doi.org/10.1175/2017bamsstateoftheclimate.1>
- Hall R., Jones J., Hanna E., Scaife A., Erdélyi R. Drivers and potential predictability of summer time North Atlantic polar front jet variability // *Clim. Dyn.* 2017. V. 48. P. 3869–3887.
<https://doi.org/10.1007/s00382-016-3307-0>
- Hoffmann L., Gunther G. From ERA-Interim to ERA5: the considerable impact of ECMWF’s next-generation reanalysis on Lagrangian transport simulations // *Atmos. Chem. Phys.* 2019. V. 19. P. 3097–3124.
<https://doi.org/10.5194/acp-19-3097-2019>
- Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R., Collins W., Deaven D., Gandin L., Saha S., White G., Woollen J., Chelliah M., Janowiak J., Mo K.C., Wang J., Leetmaa A., Reynolds R., Jenne R., Kung E., Salstein D. The NCEP/NCAR Reanalysis 40-year Project // *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 1996. V. 77. P. 437–471.
- Lavrov A.S., Khokhlova A.V. Klimaticheskii monitoring vetra v svobodnoi atmosfere severnogo polushariya: mnogoletnie kharakteristiki i tendentsii izmenchivosti [Climatic monitoring of wind in the free atmosphere of the Northern Hemisphere: long-term characteristics and variability trends] // *Fundamental’naya i prikladnaya klimatologiya*. 2020. № 2. S. 58–75. (In Russian).
- Lee S.H., William P.D., Frame T.A. Increased shear in the North Atlantic upper-level jet stream over the past four decades // *Nature*. 2019. V. 572. P. 639–643.
<https://doi.org/10.1038/s41586-019-1465-z>
- Manney G.L., Hegglin M.I. Seasonal and regional variations of long-term changes in upper-tropospheric jets from reanalyses // *J. Clim.* 2018. V. 31(1). P. 423–448.
<https://doi.org/10.1175/jcli-d-17-0303.1>
- McVicar T.R. Global review and synthesis of trends in observed terrestrial near-surface wind speeds: implications for evaporation // *J. Hydrol.* 2012. V. 416–417. P. 182–205.
- Nerushev A.F., Kramchaninova E.K. Metod opredeleniya kharakteristik atmosferykh dvizhenii po dannym izmerenii meteorologicheskikh geostatsionarnykh sputnikov [Method for determining the characteristics of atmospheric motions from data from meteorological geostationary satellites] // *Issledovanie Zemli iz kosmosa*. 2011. № 1. S. 3–13. (In Russian).
- Nerushev A.F., Visheratin K.N., Ivangorodskii R.V. Prostranstvenno-vremennaya izmenchivost’ vysotnykh struiynykh techenii po dannym sputnikovykh izmerenii [Spatial-temporal variability of high-altitude jet streams according to satellite measurements] // *Issledovanie Zemli iz kosmosa*. 2017. № 6. S. 31–45. (In Russian).
- Nerushev A.F., Visheratin K.N., Ivangorodskii R.V. Dinamika vysotnykh struiynykh techenii po dannym sputnikovykh izmerenii i ikh svyaz’ s klimaticheskimi parametrami i krupnomasshtabnymi atmosferynymi yavleniyami [Dynamics of high-altitude jet streams according to satellite measurements and their relationship with climatic parameters and large-scale atmospheric phenomena] // *Issledovanie Zemli iz kosmosa*. 2018. № 6. S. 24–38. (In Russian).

- Nerushev A.F., Visheratin K.N., Ivangorodskii R.V.* Statisticheskaya model' vremennoi izmenchivosti kharakteristik vysotnykh struinykh techenii severnogo polushariya na osnove sputnikovyykh izmerenii [Statistical model of temporal variability of characteristics of high-altitude jet streams in the Northern Hemisphere based on satellite measurements] // *Izv. RAN FAO*. 2021. T. 57. № 4. S. 401–413. (In Russian).
- Pena-Ortiz C., Gallego D., Ribera P., Ordonez P., Alvarez-Castro M.D.C.* Observed trends in the global jet stream characteristics during the second half of the 20th century // *J. Geophys. Res. Atmosph.* 2013. V. 118. P. 2702–2713. <https://doi.org/10.1002/jgrd.50305>
- Tian Q., Huang G., Hu K., Niyogi D.* Observed and global climate model based changes in wind power potential over the northern hemisphere during 1979–2016 // *Energy*. 2019. V. 167. P. 1224–1235.
- Wang X.L., Feng Y., Chan R., Isaac V.* Inter-comparison of extra-tropical cyclone activity in nine reanalysis datasets // *Atmos. Res.* 2016. V. 181. P. 133–153. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2016.06.010>
- Zeng Z., Ziegler A.D., Searchinger T.* A reversal in global terrestrial stilling and its implications for wind energy production // *Nat. Clim. Chang.* 2019. V. 9. P. 979–985. <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0622-6>
- Zolotov S.Yu., Ippolitov I.I., Loginov S.V., Kharyutkina E.V.* Izmenchivost' subtropicheskogo struinogo techeniya yuzhnogo polushariya vo vtoroi polovine XX i nachale XXI veka [Variability of the subtropical jet stream in the Southern Hemisphere in the second half of the 20th and early 21st centuries] // *Izv. RAN FAO*. 2018. T. 54. № 5. S. 505–515. (In Russian).