

УДК 551.583.16

Г.В. Суркова<sup>1</sup>, А.А. Крылов<sup>2</sup>

## СИНОПТИЧЕСКИЕ СИТУАЦИИ, СПОСОБСТВУЮЩИЕ ФОРМИРОВАНИЮ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЙ СКОРОСТИ ВЕТРА В БАРЕНЦЕВОМ МОРЕ

Исследован многолетний режим экстремальных значений приземной скорости ветра для Баренцева моря по результатам реанализа ERA-Interim за период 1981–2010 гг. Выполнена оценка пространственно-временной изменчивости величины скорости ветра с обеспеченностью 0,1; 1,5 и 50%. Показано, что в 1981–2010 гг. значения экстремальной скорости ветра не демонстрируют направленного тренда, но в 1990-е гг. отмечено их увеличение, что согласуется с активизацией в это десятилетие южного меридионального типа циркуляции по Б.Л. Дзердзеевскому. По данным о поле атмосферного давления на уровне моря для событий с экстремальными значениями скорости ветра (1%-ный уровень значимости) выполнена типизация синоптических ситуаций, в результате чего выделено 4 основных типа. Показано, что значительная часть таких ситуаций связана с прохождением над Баренцевым морем циклонических образований, а расположение их центров определяет преобладающие тех или иных направлений ветра над разными частями моря. Для каждого типа выполнена количественная оценка его ежегодной повторяемости и многолетней изменчивости. Количественное описание поля давления для выделенных синоптических типов позволило автоматизировать процесс анализа многолетней изменчивости, а также перейти к расчету прогноза повторяемости этих явлений в будущем.

*Ключевые слова:* экстремальные значения скорости ветра, типизация синоптических процессов, современный климат, Арктика.

**Введение.** Работа посвящена исследованию многолетнего режима полей экстремальных значений скорости ветра над Баренцевым морем. Акватория этого моря обладает большим значением для нашей страны с точки зрения добычи полезных ископаемых, рыбного промысла и судоходства. Даже в месяцы наибольшего оледенения (март и апрель) около 35% его площади (юго-западная часть) не покрывается льдом, что увеличивает экономическое значение единственного незамерзающего арктического порта нашей страны – Мурманска.

Сведения об экстремальных значениях скорости ветра представляют основу для проектирования нагрузок на самые различные объекты – от мачт, антенн и рекламных щитов до нефтяных вышек. Сильный ветер над морской поверхностью, особенно в открытом море, способен вызывать штормовое волнение. Штормовые явления, как и другие опасные гидрометеорологические явления на море, наносят большой ущерб экономике и населению. Объекты инфраструктуры, оказывающиеся в штормовой зоне, нередко подвергаются разрушениям, а людям угрожает опасность. Более того, штормовые процессы на море играют важную роль в формировании рельефа прибрежной территории – они могут провоцировать интенсивную эрозию морских берегов, а также влиять на дрейфующие льды, существенно повышая скорость их передвижения. Очевидно, что выяснение природы высокой скорости ветра может способствовать снижению экономических издержек вследствие разрушительного действия

штормов, кроме того и существенно повысит уровень безопасности на акватории моря. Особенно важно выполнение таких оценок с учетом меняющегося климата [Второй... , 2014].

Цель работы заключалась в исследовании современного (1981–2010) режима экстремальных значений скорости ветра над Баренцевым морем и сопутствующих им синоптических ситуаций. Несмотря на известные обобщения сведений о ветровом режиме Баренцева моря (например, [Гидрометеорология, 1990]), подробный пространственно-временной анализ ветрового режима над этим морем стал возможен лишь в последние десятилетия на основе результатов спутниковых наблюдений и реанализов. Эти источники данных существенно восполняют отсутствие данных над морями, где инструментальные наблюдения нерегулярны во времени и пространстве. Особенную сложность представляет анализ относительно редких событий, вызывающих сильный ветер и штормовое волнение и наносящих наибольший экономический ущерб.

Мы продолжили предыдущие исследования экстремальных значений скорости ветра над Баренцевым морем [Суркова и др., 2015]. Нами проанализированы полученные результаты оценки функций распределения скорости ветра, в частности, для случаев с высокой скоростью ветра, для которых предложена типизация синоптических событий, сопровождающих это опасное явление. Формализация типов синоптических процессов в современном климате позволила проанализировать многолетние из-

<sup>1</sup> Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, географический факультет, кафедра метеорологии и климатологии, доцент, канд. геогр. н.; e-mail: galina\_surkova@mail.ru

<sup>2</sup> Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, географический факультет, кафедра метеорологии и климатологии, студент; e-mail: aloshakrylov@bk.ru

менения их повторяемости. В дальнейшем на основе модельного прогноза полей скорости ветра в XXI в. планируется использовать полученную типизацию как основу вероятностного прогноза повторяемости опасных ситуаций. Данные о полях ветра и атмосферного давления получены на основе реанализа ERA-Interim.

**Материалы и методы исследований.** Оценка экстремальных значений скорости ветра и типизация соответствующих им синоптических ситуаций выполнена для Баренцева моря (72–76° с.ш., 16–48° в.д.) на основании результатов реанализа ERA-Interim [Dee et al., 2011], для зональной и меридиональной компонент скорости ветра (далее  $u$ - и  $v$ -компоненты) и атмосферного давления на уровне моря (SLP) для периода 1981–2010 гг.

В настоящее время реанализы являются исключительно полезным инструментом получения сведений о современном многолетнем режиме атмосферы, восполняющим пробелы инструментальных измерений. В качестве конечного продукта реанализы представляют поля метеорологических полей с регулярным и очень подробным пространственно-временным разрешением. Каждый реанализ имеет свою вычислительную платформу, базирующуюся на прогностической модели атмосферы. Работы последних лет по сравнению результатов реанализов между собой и с данными наблюдений демонстрируют их высокое качество в глобальном масштабе. Однако, как показывают региональные верификации реанализов, выбор источника данных для ограниченной территории требует дополнительных оценок. Мы исходили из выводов для территории Арктики, представленных в [Lindsay et al., 2014], где приведены результаты сравнения 7 наиболее хорошо зарекомендовавших себя реанализов. На основании этой работы мы выбрали реанализ ERA-Interim, по результатам которого поля атмосферного давления на уровне моря и скорости ветра в Арктике менее других отклоняются от данных измерений.

Реанализ ERA-Interim [Dee et al., 2011] – продукт Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (ECMWF), основанный на спектральной модели прогноза погоды ECMWF. Модель имеет спектральное разрешение T255 с 60 уровнями в атмосфере по вертикали (верхний уровень находится на высоте 0,1 ГПа). Данные усваиваются при помощи четырехмерного вариационного анализа с использованием данных оперативного анализа ECMWF. Результаты реанализа охватывают период с 1979 по 2016 г. и регулярно пополняются. По сравнению с предыдущими проектами ECMWF (например, ERA-40) ERA-Interim характеризуется лучшим пространственным разрешением – 0,75°x0,75° по широте и долготе. Временное разрешение составляет 6 ч. (00, 06, 12, 18 ч. всемирного скоординированного времени ВСВ).

Выбор периода исследований 1981–2010 гг. обусловлен тем, что согласно предложению Всемирной метеорологической организации (ВМО) в июне

2015 г. (<https://www.wmo.int> «New Two-Tier approach on “climate normals”») его рекомендуется рассматривать как базовый «современный», относительно которого (наряду с периодом 1961–1990 гг.) выполняются оценки климатических изменений.

Модуль скорости ветра рассчитывался для каждой ячейки реанализа 4 раза в сутки по значениям зональной и меридиональной компонент скорости ветра  $u$  и  $v$ :

$$V = \sqrt{u^2 + v^2}, \quad (1)$$

где  $V$  – модуль горизонтальной скорости ветра,  $u$ ,  $v$  – зональная и меридиональная компоненты скорости ветра соответственно, полученные из данных реанализа.

Выбор открытой части моря, где на территорию ячеек реанализа не входят участки побережья, обусловлен следующими причинами. Расчет эволюции поля ветра в моделях атмосферы, в том числе используемых для реанализа, выполняется на основании уравнений движения, где в качестве определяющих факторов выступают сила барического градиента, сила Кориолиса и сила трения. Сила Кориолиса зависит от широты и угловой скорости вращения Земли, которые задаются при моделировании как внешние факторы, поэтому возможные погрешности расчета модели на точность оценки этой силы не влияют. Сравнительный анализ порядка величин градиента давления ( $10^{-3}$ ) и силы трения ( $10^{-12}$ ) в уравнениях движения показывает, что именно горизонтальный барический градиент является определяющим фактором [Holton, 2004].

Кроме того, точность расчета величины силы поверхностного трения зависит от правильного задания границ суши и ее рельефа, а также от параметризаций, используемых в моделях для описания приземного слоя атмосферы и ее взаимодействия с подстилающей поверхностью. С учетом этих сложностей режим ветра над морем наиболее трудно описать в прибрежной зоне, так как здесь изрезанность береговой линии и орографические особенности могут создавать локальные циркуляционные эффекты, горизонтальные масштабы которых меньше, чем размеры ячейки в модели атмосферы. Такие эффекты могут не отразиться в результатах моделирования, представляющих среднюю величину по ячейке, что увеличивает погрешность расчетов и занижает значения скорости ветра [Кислов и др., 2015]. В связи с этим наиболее успешно модели воспроизводят климатический режим относительно однородной поверхности [Кислов и др., 2008; Эколого-географические..., 2011], поэтому для исследования была выбрана открытая часть моря.

Основная цель работы предполагала выбор дней с наиболее сильным ветром, чтобы затем оценить синоптические ситуации, сопровождающие эти случаи. На рис. 1 представлены результаты, полученные на начальном этапе работы при выборе метода оценки скорости ветра. В первом варианте (UV-метод) использовался традиционный расчет модуля

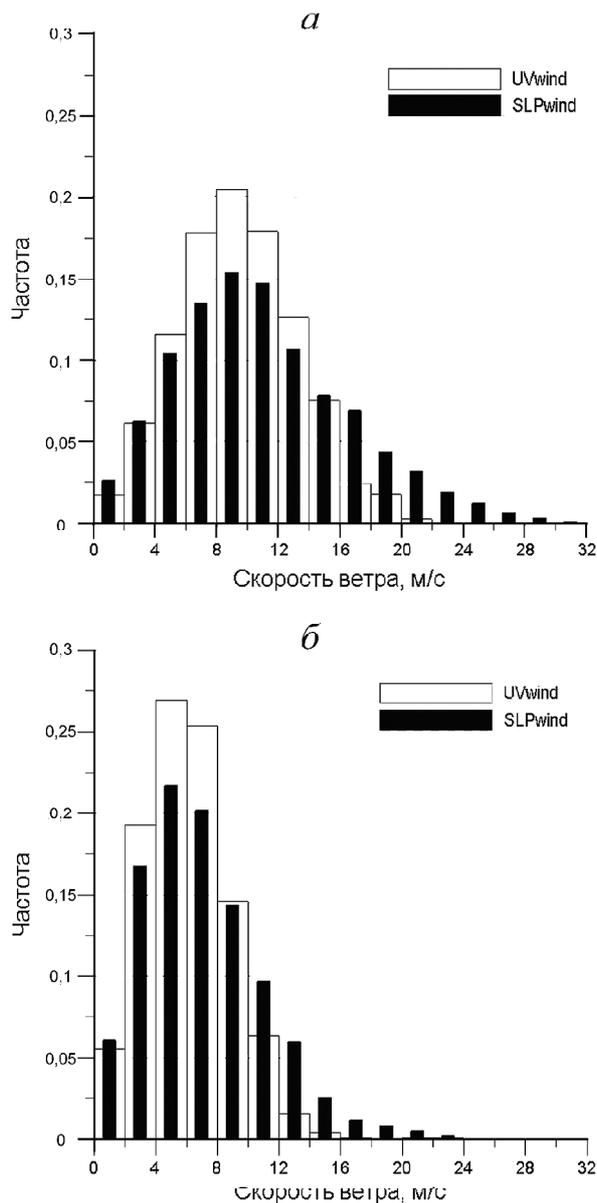


Рис. 1. Эмпирическая функция распределения значений скорости ветра, рассчитанная по  $u$ - $v$ -компонентам (UVwind) и по полю давления (SLPwind) для центральной части Баренцева моря:  $a$  – январь,  $b$  – июль, 1981–2010 гг.

Fig. 1. Empirical probability function of wind speed distribution calculated from  $u$ - $v$ -components (UVwind) and the sea level pressure (SLPwind) for the central part of the Barents Sea;  $a$  – January,  $b$  – July, 1981–2010

скорости по зональной и меридиональной компонентам – уравнение (1). Во втором варианте (SLP-метод), исключив влияние силы трения, по полю приземного давления был рассчитан геострофический ветер. Известно, что в реальности геострофические соотношения верны для свободной атмосферы, где сила трения не влияет на скорость и направление ветра. Тем не менее расчет модуля скорости ветра по геострофическому соотношению на основе приземного поля давления успешно применяется в некоторых задачах, в том числе при оценке экстремальных значений скорости ветра над морями, например [Wang et al., 2009]. В этом случае он иг-

рает роль своеобразного индекса, показывающего области наибольшего горизонтального барического градиента, что и должно, с учетом его определяющей роли в уравнениях движения, отражать зоны сильного ветра. Удобство такого подхода состоит еще и в том, что для приземного слоя атмосферное давление гораздо успешнее воспроизводится в реанализах, чем компоненты скорости ветра.

Из анализа рис. 1 следует, что значения скорости ветра, рассчитанные первым способом, как и ожидалось, в центральной части распределения заметно выше, чем геострофические, но ниже в районе экстремумов. Рис. 2,  $a$  демонстрирует, что межгодовая изменчивость значений скорости ветра, полученных по геострофическим соотношениям, заметно больше, чем с применением UV-метода. Для нескольких районов моря выполнены оценки связи скорости, рассчитанной двумя указанными способами. Они с высокой точностью аппроксимируются линейными функциями. Но, несмотря на однородность подстилающей поверхности, выявлены некоторые региональные различия этих зависимостей. Кроме того, для количественной оценки климатических ресурсов (штормовое волнение, нагрузка на сооружения, навигация, ветроэнергетика и др.) полезно знать прямые значения модуля скорости ветра, особенно ее возможные экстремумы. Поэтому на следующем этапе работы использовались оценки скорости ветра, полученные первым способом.

Для составления календаря случаев с экстремально высокими значениями скорости ветра и анализа их пространственного и временного распределения использован подход, связанный с введением пороговых величин рассматриваемых параметров. Он основан на понимании экстремальных метеорологических явлений как редких, т.е. тех значений, вероятность достижения которых крайне мала (например, имеет обеспеченность 10, 5 или 1%). Обычно они задаются как процентиля соответствующих функций распределения [Рожков, 2003]. Для этого в пределах рассматриваемой территории для каждого узла сетки реанализа рассчитаны функции распределения значений скорости ветра за период 1981–2010 гг.

На следующем этапе составлен календарь событий с экстремальными значениями скорости. Дата заносилась в календарь, если более чем на 30% исследуемой территории в открытом море значения скорости ветра были выше критических значений хотя бы в один из четырех сроков этого дня. В качестве порогового критерия использовались осредненные по выделенной территории (72–76 с.ш., 16–48° в.д.) процентиля значений скорости ветра для 5-, 1- и 0,1%-ной обеспеченности ( $V_{95}$ ,  $V_{99}$ ,  $V_{99,9}$ ), они получились следующими:  $V_{95}=14,3$ ;  $V_{99}=17,2$ ;  $V_{99,9}=20,3$  м/с. При таких условиях число случаев за 30 лет составило для  $V_{95}$  более 1200, для  $V_{99}$  – 240, для  $V_{99,9}$  – 12 дней.

После того как были установлены даты опасного явления, проводилась процедура анализа и си-

стематизации соответствующих синоптических ситуаций. Для этого использовалось поле давления у поверхности моря, определяющее режим скорости ветра. Систематизация большого набора штормовых полей приземного давления осуществлялась методом их разложения на естественные ортогональные составляющие, после чего выполнялась группировка по евклидовому расстоянию между полями в рамках кластерного анализа. В современных условиях при возможности автоматизированной обработки больших массивов данных подобный подход активно и успешно применяется в отношении различных гидрометеорологических явлений, в том числе экстремальных, зависящих от типа погодной ситуации [Huth et al., 2008]. Подобный подход применялся нами ранее для Черного, Каспийского и Балтийского морей как для оценки современных условий, так и для климатического прогноза [Кислов и др., 2016; Суркова и др., 2012, 2015; Arkhipkin et al., 2014; Surkova et al., 2015].

Окончательная типизация синоптических ситуаций выполнена для  $V \geq V_{99}$ . Выбор  $V_{99}$  в качестве порогового значения обусловлен тем, что число случаев представляет репрезентативную по длине выборку, кроме того, эти события происходят в среднем 8 раз в год, т.е., несмотря на их невысокую повторяемость, ежегодная вероятность достижения таких значений сохраняется. Вся совокупность случаев для  $V \geq V_{99}$  разбита на четыре типа, которые далее представлены в результатах.

**Результаты исследований и их обсуждение.** Средний многолетний годовой ход срочных значений скорости ветра, показанный на рис. 2,а, представляет типичную картину их ослабления в летний сезон. В это время уменьшается межширотный градиент температуры, а циклоническая деятельность ослабевает; в холодный сезон циклоническая активность и скорость ветра, наоборот, возрастают. Годовая амплитуда медианных значений составляет около 5 м/с.

Многолетние изменения значений скорости разной обеспеченности представлены на рис. 2,б, из анализа которого следует, что наклон линии тренда в целом показывает слабое уменьшение. Это согласуется и с оценками,

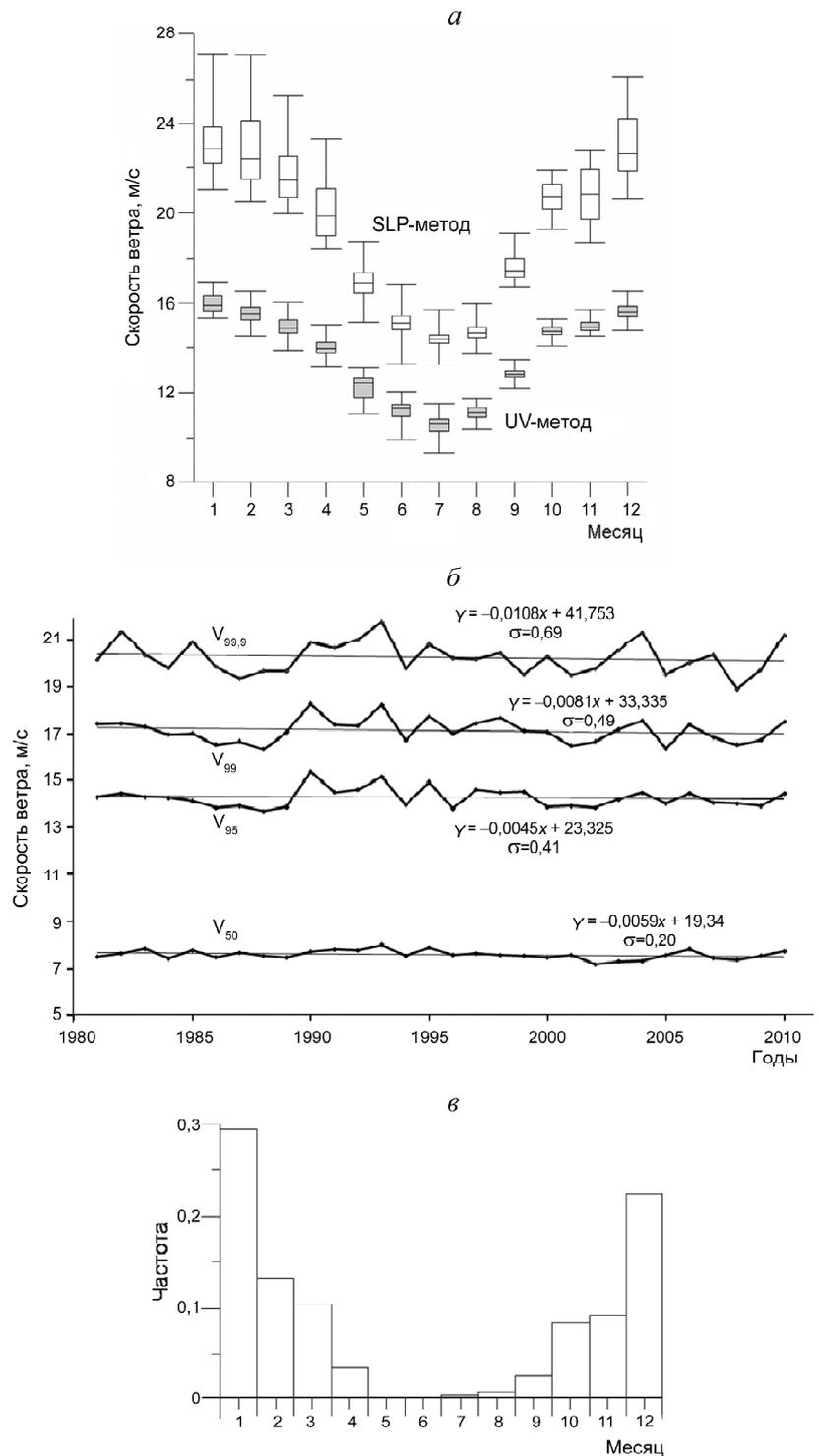


Рис. 2. Диаграммы размаха среднего многолетнего годового хода значений  $V_{95}$  (а), многолетние изменения квантильных значений скорости ветра ( $V_{50}$ ,  $V_{95}$ ,  $V_{99}$ ,  $V_{99.9}$ ) для осредненных данных по выделенной открытой акватории Баренцева моря (72–76° с.ш., 16–48° в.д.), прямая линия – тренд, приведены уравнения линии тренда и стандартное отклонение (б), а также годовой ход повторяемости синоптических ситуаций, сопровождающих значения скорости ветра  $V \geq V_{99}$  (в)

Fig. 2. Range diagrammes («box-whisker» plot) of mean annual values of  $V_{95}$  (а). Interannual changes of quantile values of wind speed ( $V_{50}$ ,  $V_{95}$ ,  $V_{99}$ ,  $V_{99.9}$ ) averaged over the Barents Sea (72–76 N, 16–48 E), straight line shows the trend, equations of trends and standard deviation are shown (б), annual variations of the frequency of synoptic patterns accompanying wind speed  $V \geq V_{99}$  (в)

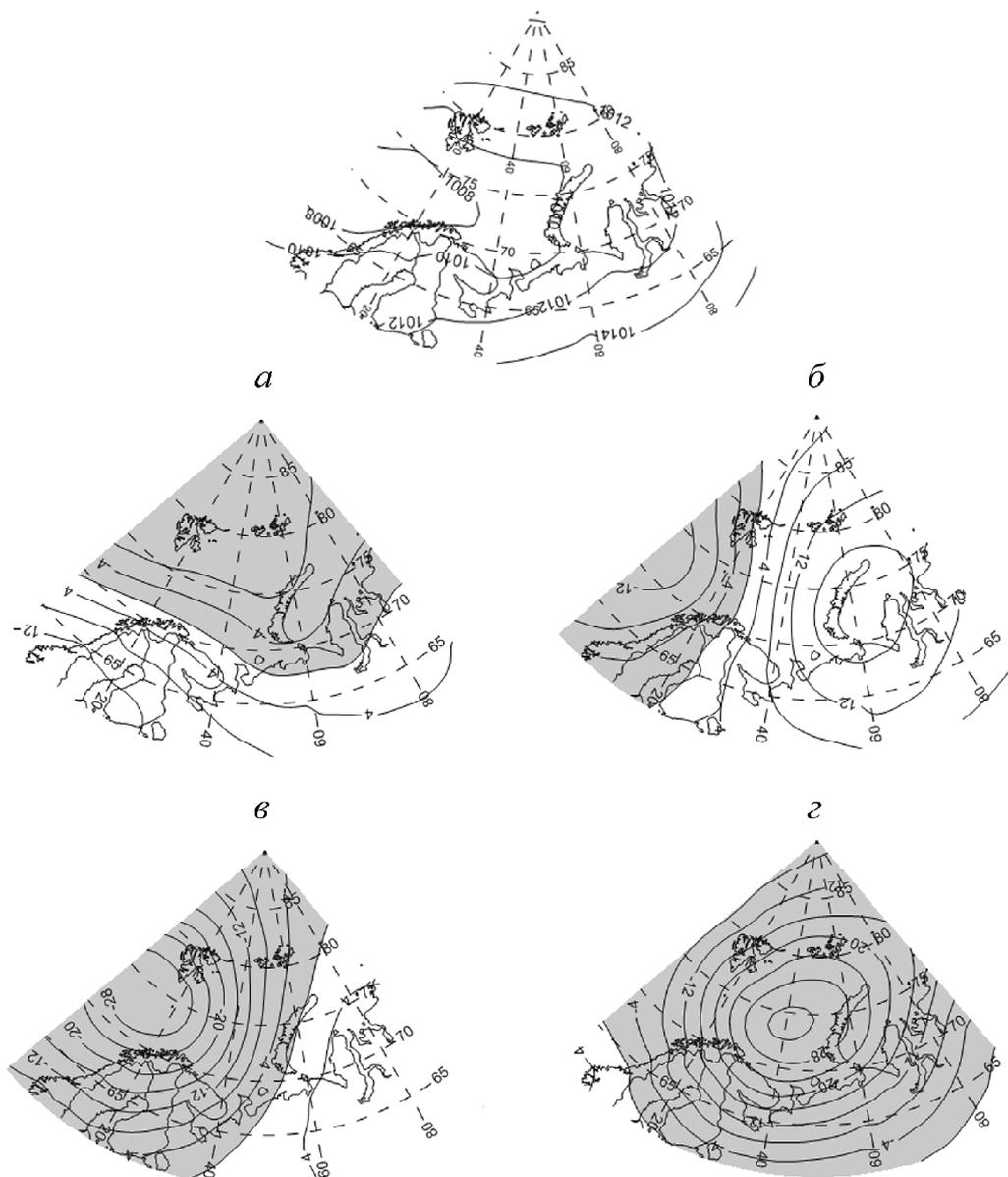


Рис. 3. Среднее атмосферное давление за период с 1981 по 2010 г. для территории 60–90° с.ш., 0–90° в.д. (вверху). Типы аномалий (отклонения от поля среднего атмосферного давления, ГПа) приземного давления над открытой акваторией Баренцева моря (60–90° с.ш., 0–90° в.д.): а – тип 1 (29%), б – тип 2 (31%), в – тип 3 (25%), г – тип 4 (15%). В скобках – повторяемость аномалий. Области, залитые серым цветом, соответствуют отрицательным аномалиям, изолинии проведены через 4 ГПа

Fig. 3. Mean sea level pressure, 1981–2010, for the area 60–90 N, 0–90 E (upper panel – Types of sea level pressure anomalies (hPa) above the Barents Sea (60–90 N, 0–90 E) (lower panel): а – type 1 (29%), б – type 2 (31%), в – type 3 (25%), г – type 4 (15%). The frequency of anomalies patterns is given in brackets. Areas filled by grey colour correspond to negative anomalies; isolines are for each 4 hPa

представленными в оценочных докладах [Второй..., 2014; IPCC, 2013], где для последних десятилетий констатируется слабое уменьшение скорости ветра в средних и высоких широтах, но их увеличение на север от 75–80° с.ш. Межгодовая изменчивость квантильных значений возрастает для более редких событий – среднее квадратическое отклонение значений средней годовой скорости меняется от 0,20 для медианы ( $V_{50}$ ) до 0,69 для  $V_{99,9}$ . Также можно отметить общую тенденцию к некоторому росту экстремальных значений скорости в начале 1990-х гг., в это же время (см. рис. 4) возрастало и число событий с экстремальными значениями скорости ветра.

Отметим, что, согласно исследованиям атмосферных циркуляционных процессов с позиций классификации Б.Л. Дзердзеевского, в этот период резко усилилась повторяемость процессов южного меридионального типа [Кононова, 2015]. При таком типе циркуляции мощный стационарный антициклон занимает большую часть Евразии, над Северной Атлантикой развита интенсивная циклоническая деятельность. Зарождающиеся на арктическом фронте циклоны проникают оттуда в Арктику через Гренландию и Баренцево море. Траектории движения таких циклонов обусловлены мощными ведущими потоками субмеридионального направления, свя-

занными с континентальными антициклоническими системами. В годовом ходе повторяемости синоптических ситуаций, обеспечивающих высокие значения скорости ветра, наиболее ярко выделяется период с октября по март (рис. 2,б). В это время, благодаря активизации циклонической деятельности, скорость ветра резко возрастает.

Важной задачей нашего исследования было выявление типовых полей атмосферного давления, сопутствующих экстремально высоким значениям скорости ветра ( $V \geq V_{99}$ ). Над акваторией Баренцева моря атмосферное давление в среднем понижено (рис. 3,а), что связано с активной циклонической деятельностью на арктическом фронте, поддерживаемой бароклинной неустойчивостью в районе влияния теплого Северо-Атлантического течения. Результаты кластерного анализа позволяют считать, что в результате климатических исследований с хорошим уровнем достоверности можно выделить 4 основных типа. Отклонения атмосферного давления на уровне моря от среднего многолетнего для каждого типа представлены на рис. 3,а-г. Рассмотрим их подробнее.

Тип 1 (рис. 3,а) характеризуется наиболее однородным полем аномалии атмосферного давления по сравнению с другими типами (отклонение от среднего многолетнего поля давления не превышает 12 ГПа). Отрицательная аномалия занимает почти всю территорию Баренцева моря и наиболее ярко выражена в районе Шпицбергена, в то время как над материком давление выше средних значений. При этом типе синоптической ситуации штормовой ветер наблюдается на южной периферии быстро перемещающихся на восток циклонов из Северной Атлантики (район Гренландии) в направлении арх. Земля Франца-Иосифа. Это один из наиболее частых (наравне с типом 2) типов синоптических ситуаций,

звания: циклон, выходящий на акваторию Баренцева моря из районов Северной Атлантики, и мощный антициклон, центр которого расположен над арх. Новая Земля и восточной частью Карского моря. Изобары в этом случае ориентированы практически меридионально. Такая ситуация в наибольшей степени отвечает случаям, когда высокие значения скорости ветра связаны с южным ветром, на что указано, например, в работе [Суркова и др., 2015], где отмечено, что для Баренцева моря характерны два приоритетных сектора направлений ветра, при которых их скорость развивается до максимальных значений, – западный и южный.

Отличительная черта типа 3 (рис. 3,в) – глубокий циклон (перепад давления от периферии к центру составляет около 30 ГПа), смещающийся на восток от Исландии на Скандинавию. На восточной периферии этого барического образования наблюдаются сильные восточные и северо-восточные ветры. Частота повторяемости этого типа немного меньше повторяемости первых двух типов синоптических ситуаций (25%).

Для типа 4 (рис. 3,д) характерно присутствие особенно глубокого циклона (давление в центре циклона на 35 ГПа меньше среднего многолетнего значения). Центр циклона смещен восточнее, чем в типе 3, и над севером европейской территории России (ЕТР) отсутствует положительная аномалия в поле давления. Частота повторяемости этого типа существенно ниже, чем у остальных типов (15%). Такая циркуляция может формироваться за счет регенерации цилона на арктическом фронте. При этом высокие значения скорости ветра над Баренцевым морем наблюдаются в тылу циклона.

Многолетняя изменчивость ежегодного числа дней с  $V \geq V_{99}$  с учетом типа синоптической ситуации (рис. 4) показывает, что в начале и в кон-

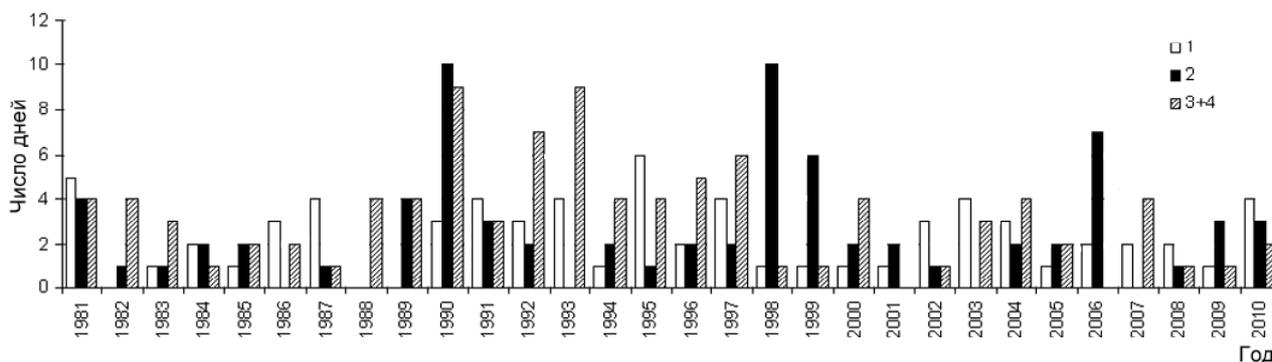


Рис. 4. Многолетние изменения ежегодного числа дней с сильным ветром ( $V \geq V_{99}$ ) над акваторией Баренцева моря (72–76° с.ш., 16–48° в.д) с учетом типа циркуляции; 1, 2, 3+4 – номера типов синоптических ситуаций

Fig. 4. Interannual changes of the yearly number of days with strong wind speed ( $V \geq V_{99}$ ) over the Barents Sea (72–76 N, 16–48 E) according to the circulation type; 1, 2, 3+4 – synoptic pattern numbers

обуславливающих высокие значения скорости ветра на Баренцевом море (частота 29%).

Тип 2 (рис. 3,б) отличается большими аномалиями поля давления, чем для типа 1. На карте отчетливо видны два выраженных барических обра-

це 1990-х гг. отмечалось увеличение повторяемости процессов типа 2, при котором усиливается меридиональная составляющая ветра. Это согласуется и с данными классификации Б.Л. Дзержевского [Кононова, 2015].

**Выводы:**

– сравнение двух способов оценки экстремальных значений скорости ветра над Баренцевым морем для современного (1981–2010 гг.) климата показало, что для решения поставленных задач с учетом последующей оценки климатических ресурсов удобнее использовать способ, базирующийся на данных о зональной и меридиональной компонентах приземной скорости ветра;

– на основании рассчитанных значений модуля скорости ветра получены показатели функций распределения и величин различной обеспеченности;

– анализ режима экстремальных скоростей ветра над Баренцевым морем показал, что на протяжении рассматриваемого временного отрезка их многолетний выраженный тренд отсутствует, хотя для 1990-х гг. отмечается увеличение значений скорости и рост повторяемости процессов меридионального типа;

– для указанного периода создан календарь событий, когда над центральной частью моря наблюдались высокие значения приземной скорости ветра. Для этих случаев выполнена типизация полей атмосферного давления на уровне моря, выявлено 4 основных типа синоптических ситуаций. Продемонстрировано, что три из них отражают присутствие глубоких циклонов над акваторией Баренцева моря, различаясь расположением их центра и глубиной; четвертый тип характеризуется наличием мощного антициклона над архипелагом Новая Земля и Карским морем.

– развиваемая методика климатических исследований дает возможность оценить, с какой частотой проанализированные в статье синоптические ситуации могут встречаться в будущем. Эта работа представляет основу для дальнейшей оценки прогноза повторяемости выявленных типичных синоптических ситуаций, вызывающих штормовые процессы, по сценариям будущего климата.

**Благодарности.** Работа выполнена за счет грантов РНФ (проект № 14-37-00038) и РФФИ (проект № 14-05-91769).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. М.: Росгидромет, 2014. 1008 с.

Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. I. Баренцево море. Выпуск 1. Гидрометеорологические условия / Под ред. Ф.С. Терзиева и др. Л.: Гидрометеоздат, 1990. 280 с.

Кислов А.В., Евстигнеев В.М., Малхазова С.М. и др. Прогноз климатической ресурсообеспеченности Восточно-Европейской равнины в условиях потепления. М.: МАКС Пресс, 2008. 292 с.

Кислов А.В., Матвеева Т.А., Платонов В.С. Экстремальные скорости ветра в Арктике // *Фундаментальная и прикладная климатология*. 2015. № 2. С. 63–80.

Кислов А.В., Суркова Г.В., Архипкин В.С. Повторяемость штормовых ситуаций в Балтийском, Черном и Каспийском морях в изменяющихся климатических условиях // *Метеорология и гидрология*. 2016. № 2. С. 67–77.

Кононова Н.К. Изменения циркуляции атмосферы Северного полушария в XX–XXI столетиях и их последствия для климата // *Фундаментальная и прикладная климатология*. 2015. № 1. С. 133–162.

Рожков В.А. Теория и методы статистического оценивания случайных величин и функций с гидрометеорологическими примерами. СПб.: Гидрометеоздат, 2001. 330 с.

Суркова Г.В., Колтерманн К.П., Кислов А.В. О методе прогноза штормовых условий при изменениях климата // *Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География*. 2012. № 6. С. 25–31.

Суркова Г.В., Соколова Л.А., Чичев А.П. Многолетний режим экстремальных значений скорости ветра в Баренцевом и Карском морях // *Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География*. 2015. № 5. С. 54–59.

Эколого-географические последствия глобального потепления климата XXI века на Восточно-Европейской равнине и в Западной Сибири / Под ред. Н.С. Касимова, А.В. Кислова. М.: МАКС Пресс, 2011. 496 с.

Arkipkin V.S., Gippius F.N., Koltermann K.P., Surkova G.V. Wind waves in the Black Sea: results of a hindcast study // *Natural Hazards and Earth System Science*. 2014. Vol 14(11). P. 2883–2897.

Dee D.P., Uppala S.M., Simmons A.J. et al. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system // *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 2011. Vol. 137. P. 553–597.

Holton J.R. An Introduction to dynamic meteorology. 4th ed. San Diego: Academic Press, 2004. 552 p.

Huth R., Beck C., Philipp A. et al. Classifications of Atmospheric Circulation Patterns Recent Advances and Applications. Trends and Directions in Climate Research // *Ann. N.Y. Acad. Sci.* 2008. Vol. 1146. P. 105–152.

IPCC, 2013: Summary for Policymakers // *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* / Eds T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner et al. Cambridge, N.Y.: Cambridge University Press, 2013.

Lindsay R., Wensnahan M., Schweiger A., Zhang J. Evaluation of seven different atmospheric reanalysis products in the Arctic // *J. Climate*, 2014. Vol. 27. P. 2588–2606.

Surkova G.V., Arkipkin V.S., Kislov A.V. Atmospheric circulation and storm events in the Baltic Sea // *Open Geosci.* 2015. N 1. P. 332–341.

Wang X., Zwiers F., Swail V., Feng Y. Trends and variability of storminess in the Northeast Atlantic region, 1874–2007 // *Climate Dynamics*. 2009. Vol. 33, N 7. P. 1179–1195.

Поступила в редакцию 11.04.2016  
Принята к публикации 26.07.2016

G.V. Surkova<sup>1</sup>, A.A. Krylov<sup>2</sup>SYNOPTIC PATTERNS OF EXTREME WIND SPEED  
IN THE BARENTS SEA

Long-term regime of extreme values of the surface horizontal wind speed ( $V$ ) was studied for the open part of the Barents Sea basing on the ERA-Interim reanalysis data for 1981-2010. Empirical distribution functions of  $V$  were estimated. Spatial and temporal analysis of the median and extreme  $V$  (95<sup>th</sup>, 99<sup>th</sup> and 99.9<sup>th</sup> percentiles) variability was carried out. No long-term trend was revealed for the whole period, but in the 1990s wind speed extreme values tended to be higher. The latter is in agreement with the increase of the southern type of meridian circulation (according to Dzerdzevsky's classification). Sea level pressure patterns for the days with high  $V$  (99%) were classified into four circulation types. It is shown that the majority of such cases were characterized by active cyclones passing over the sea, and wind direction in different sea parts depended on the cyclone center position. The year-to-year variability was studied for every circulation type. Quantitative description of sea level pressure patterns for high wind speed values allowed processing the long-term data set and creating a basis for the future evaluation of projected extreme patterns under possible climate changes.

*Key words:* extreme wind speed, synoptic patterns, modern climate, the Arctic.

*Acknowledgements.* The study was financially supported by the Russian Science Foundation (project 14-37-00038) and the Russian Foundation for Basic Research (project 14-05-91769).

## REFERENCES

- Arkipkin V.S., Gippius F.N., Koltermann K.P., Surkova G.V. Wind waves in the Black Sea: results of a hindcast study // *Natural Hazards and Earth System Science*. Vol. 14(11). P. 2883–2897.
- Dee D.P., Uppala S.M., Simmons A.J., Berrisford P. et al. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system // *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 2011. Vol. 137. P. 553–597.
- Ekologo-geograficheskie posledstviya global'nogo potepleniya klimata XXI veka na Vostochno-Evropejskoj ravnine i v Zapadnoj Sibiri [Ecological and geographical sequences of the global climate warming in 21 century over the Eastern-European plain and in Western Siberia], Eds. N.S. Kasimov, A.V. Kislov, Moscow, MAKS Press, 2011, 496 p. (in Russian).
- Gidrometeorologija i gidrohimija morej SSSR. T. I. Barencevo more. Vyp. 1. Gidrometeorologicheskie uslovija [Hydrometeorology and hydrochemistry of USSR seas, vol. 1, Barents Sea, issue 1, Hydrometeorological conditions], Leningrad, Gidrometeoizdat, 1990, 280 p. (in Russian).
- Holton J.R. An Introduction to Dynamic Meteorology. San Diego: Academic Press, 2004, 552 p.
- Huth R., Beck C., Philipp A. Classifications of Atmospheric Circulation Patterns Recent Advances and Applications. Trends and Directions in Climate Research // *Ann. N.Y. Acad. Sci.* 2008. Vol. 1146. P. 105–152.
- IPCC, 2013: Summary for Policymakers // *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* / Eds T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner et al. Cambridge, N.Y.: Cambridge University Press, 2013.
- Kislov A.V., Evstigneev V.M., Malkhazova S.M. et al. Prognoz klimaticheskoj resursoobespechennosti Vostochno-Evropejskoj ravniny v uslovijah poteplenija [Forecast of climate resources supply of the East European plain under warming], Moscow, MAKS Press, 2008, 292 p. (in Russian).
- Kislov A.V., Matveeva T.A., Platonov V.S. Jekstremal'nye skorosti vetra v Arktike [Extreme wind speed in the Arctic], *Fundamental'naja i prikladnaja klimatologija*, 2015, vol. 2, pp. 63–80 (in Russian).
- Kislov A.V., Surkova G.V., Arkipkin V.S. Occurrence frequency of storm wind waves in the Baltic, Black, and Caspian Seas under Changing Climate Conditions // *Russian Meteorology and Hydrology*. Allerton Press Inc. (United States), 2016. Vol. 41(2). P. 121–129.
- Kononova N.K. Izmenenija cirkuljacii atmosfery severnogo polusharija v XX–XXI stoletijah i ih posledstviya dlja klimata [Changes of atmospheric circulation of the Northern Hemisphere in 20-21 centuries and climate consequences], *Fundamental'naja i prikladnaja klimatologija*, 2015, vol. 1, pp. 133–162 (in Russian).
- Lindsay R., Wenshanan M., Schweiger A., Zhang J. Evaluation of seven different atmospheric reanalysis products in the Arctic // *J. Climate*. 2014. Vol. 27. P. 2588–2606.
- Rozhkov V.A. Teorija i metody statisticheskogo ocenivanja sluchajnyh velichin i funkcij s gidrometeorologicheskimi primerami [Theory and methods of random variables evaluation with hydrometeorological examples], SPb., Gidrometeoizdat, 2001, 330 p. (in Russian).
- Surkova G.V., Arkipkin V.S., Kislov A.V. Atmospheric circulation and storm events in the Baltic Sea // *Open Geosciences*. 2015. N 1. P. 332–341.
- Surkova G.V., Koltermann K.P., Kislov A.V. O metode prognoza shtormovyh uslovij pri izmenenijah klimata [On the method of storm activity projection under changing climate], *Vestnik Moskovskogo universiteta, serija 5, Geografija*, 2012, vol. 6, pp. 25–31 (in Russian).
- Surkova G.V., Sokolova L.A., Chichev A.R. Mnogoletnij rezhim jekstremal'nyh znachenij skorosti vetra v Barencevom i Karskom morjah [Long-term regime of daily wind speed maximum in Barents and Kara seas], *Vestnik Moskovskogo universiteta. Serija 5, Geografija*, 2015, vol. 5, pp. 54–59 (in Russian).
- Vtoroj ocenocnyj doklad Rosgidrometa ob izmenenijah klimata i ih posledstvijah na territorii Rossijskoj Federacii [Second assessment report of Rosgidromet about climate change and its consequences in Russia], Moscow, Rosgidromet, 2014, 1008 p. (in Russian).
- Wang X., Zwiers F., Swail V., Feng Y. Trends and variability of storminess in the Northeast Atlantic region, 1874–2007 // *Climate Dynamics*. 2009. Vol. 33(7). P. 1179–1195.

Received 11.04.2016  
Accepted 26.07.2016

<sup>1</sup> Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Meteorology and Climatology, Associate Professor, PhD. in Geography; *e-mail:* galina\_surkova@mail.ru

<sup>2</sup> Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Meteorology and Climatology, student; *e-mail:* aloshakrylov@bk.ru