

МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО ДИАПАЗОНА «ОКОЛО НУЛЯ °С» В УСЛОВИЯХ МЕНЯЮЩЕГОСЯ КЛИМАТА ЗАПАДНОЙ АРКТИКИ

А.В. Кислов, Г.В. Суркова, Т.А. Матвеева

Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,
географический факультет, кафедра метеорологии и климатологии,
Россия, 119991, Москва, Ленинские Горы, 1; avkislov@mail.ru

Резюме. Метеорологические условия в температурном диапазоне около нуля градусов Цельсия являются в высшей степени некомфортными и, в некоторых условиях, опасными. Для исследования их особенностей в комплексе, были использованы совместные функции распределения вероятности для двух метеорологических величин (в разных вариантах). Их анализ показал, что совокупность экстремумов скорости ветра в диапазоне температуры около нуля содержит смесь двух различных по генезису данных, причем каждое из подмножеств хорошо описывается распределением Вейбулла. Используя современную метафорическую терминологию, их можно отнести к черным лебедям и драконам. В то же время экстремумы осадков принадлежат только к одной совокупности. Данные модели земной системы INM-CM4 содержат только экстремумы, относящиеся к черным лебедям. Важными показателями, характеризующими метеорологические условия около нуля градусов, являются даты устойчивого перехода через ноль. Такой переход происходит весной и осенью. Показано, что глобальное потепление проявляется в сдвиге этих дат. Вдоль трансекта поперек Кольского полуострова интервал между осенним и весенним переходами возрастет к концу 21 века на величину от 1 месяца на юге до 2.5 месяцев на севере.

Ключевые слова. Изменения климата, Кольский полуостров, температурный диапазон «около 0°C», черные лебеди, драконы.

METEOROLOGICAL CONDITIONS OF THE TEMPERATURE RANGE “NEAR 0°C” UNDER CLIMATE CHANGE IN THE WESTERN ARCTIC

A.V. Kislov, G.V. Surkova, T.A. Matveeva

Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography,
Meteorology & Climatology Department,
1, Leninskye Gory, 119991, Moscow, Russia; avkislov@mail.ru

Summary. Meteorological conditions of the temperature range “near 0°C” are very uncomfortable and, in some cases, dangerous. Probability functions describing joint distribution of two meteorological variables are employed (in different ways) for the comprehensive analysis of their features. The analysis showed that the set of

wind speed extremes associated with temperature range “near 0°C” is a mixture of two different subsets. Each of subsets can be well described by the Weibull distribution. They are labeled “black swans” and “dragons” according to the modern metaphoric terminology. The set of precipitation amount associated with temperature range “near 0°C” consists of “black swans” only. The outputs of the Earth system model INM- CM4 have no “dragons”. An important index characterizing meteorological conditions “near 0°C” is the dates of transition of temperature through the zero degree level in spring and in autumn. It was shown that the global warming leads to shifting of these dates. At the end of the 21st century, the shift will be one month in the south and two and a half months in the north along the transect crossing the Kola Peninsula athwart.

Keywords. Climate change, Kola Peninsula, range “near the 0°C”, black swans, dragons.

Введение

Метеорологические условия в диапазоне температуры «около нуля °С» представляются одними из наиболее некомфортных и являются в некоторых случаях опасными. В это время наблюдаются смешанные формы осадков, в некоторых случаях может наблюдаться ледяной дождь. Типичны гололедные явления, обледенение проводов и т.д. Если еще в это время наблюдается сильный ветер, то экстремальность явления увеличивается. Поэтому возникает необходимость охарактеризовать этот комплекс явлений с различных сторон, чтобы иметь возможность оценить в дальнейшем, какие изменения будут происходить при изменениях климата.

Это исследование особенно актуально при потеплении климата (Второй оценочный доклад..., 2014). Над Норвежским и Баренцевым морями рост температуры таков, что, согласно климатическому прогнозу, к середине и к концу XXI века она гораздо чаще, чем в современном климате выходит за рамки $-5^{\circ}\text{C} < t < 5^{\circ}\text{C}$, поэтому число дней с такой температурой к концу века здесь уменьшается (Суркова, 2015). Над остальной частью российской Арктики, напротив, рост температуры приводит к увеличению повторяемости таких дней с температурой около нуля. Настоящая статья посвящена изучению этих особенностей в Западной Арктике на территории Кольского полуострова и прилегающих морских акваториях. Уже в условиях современного потепления оленеводы Кольского полуострова говорили автору статьи в 2015 г., что «теперь зима заменилась длинной осенью». Понимание ситуации и установление различных связей важно в контексте климатического прогноза. Помимо анализа статистик данного явления, важное значение имеет оценка способности его воспроизведения различными атмосферными моделями, поскольку современное прогнозирование погоды основано на использовании модельных данных. В данной работе акцент сделан на оценках потенциальной возможности воспроизведения экстремальных явлений в рамках климатического моделирования с использованием для этой цели данных модели земной системы INM-СМ4 (Володин и др., 2013).

Изучению экстремальности метеорологического режима Арктики посвящено много работ. В этом аспекте поле температуры проанализировано в (Второй оценочный ..., 2014), причем показан повсеместный характер повышения повторяемости квантильных значений. Поле осадков по стационарным данным проанализировано в (Золина, Булыгина, 2016; Donat, Lowry, Herold et al., 2016; Donat, Lowry, Alexander et al., 2016). Для этой цели применены различные индексы в качестве метрик (Frich et al., 2002) и разные базы данных. По ним для Северной Европы получен согласованный результат: тенденция роста экстремальности осадков (касающаяся продолжительности осадков и их количества) и возрастание связанных с этим рисков в течение нескольких последних десятилетий. Экстремальные скорости ветра исследованы в (Кислов и др., 2015; Кислов и др., 2016; Kislov and Matveeva, 2016), причем обнаружено, что их совокупность распадается на две генетически различные группы. Тенденции изменения экстремальных скоростей ветра над Баренцевым и Карским морями в последние десятилетия рассмотрены в (Суркова и др., 2015), где показано, что в последние десятилетия не отмечалось существенных изменений в параметрах функций распределения.

Во всех случаях это было изучение отдельных переменных лишь с привлечением информации о других переменных для углубления анализа. Эффективно представить совокупность различных условий можно путем использования аппарата многомерных функций распределения вероятности, которые позволяют проанализировать статистику внутри выбираемых диапазонов. Мы использовали двумерные функции распределения, которые, в отличие от многомерных функций, еще не теряют возможности визуальной интерпретируемости.

Примененная в настоящей работе комплексность анализа, требующая совмещенности исследования статистик различных метеорологических полей, имеет глубокую основу, поскольку во внетропических широтах экстремальность связана, как правило, с циклонической деятельностью. Действительно, сильные осадки в высоких широтах связаны исключительно с адвекцией влаги полярно-фронтальными циклонами (Пальмен, Ньютон, 1973; Trenberth et al., 2003), что часто (хотя и не всегда) сопровождается и экстремальными скоростями ветра (Кислов и др., 2015; Кислов и др., 2016; Hanesiak et al., 2010). В то же время эта генетическая связь циклогенеза и экстремальности метеорологических полей не означает наличия простых связей между свойствами циклонов и экстремальными характеристиками, на что указывает опыт синоптической работы и специальные исследования (см. например, работу (Pfahl and Wernli, 2012), в которой сопоставлены климатологии штормтреков и полей осадков). И только в особых условиях на первый план в развитии экстремальных событий выходят орографические условия (приводящие, например, к необычайно сильным для арктических широт скоростям ветра во время новоземельской боры (Kislov and Matveeva, 2016)).

Математическое моделирование экстремальных событий до сих пор сталкивается с проблемами воссоздания тонких и, в первую очередь, именно циркуляционных эффектов. Так, моделирование осадков показывает, что их

значения воссоздаются неадекватно (в рамках модели CCSM4 они завышаются по сравнению с климатологиями ERA-40 и the Global Precipitation Climatology Project (GPCP) (De Boer et al., 2012)), однако функции распределения вероятности сумм осадков воспроизводятся в целом правильно (по данным модели INM CM4, см. Кислов и др., 2016). В то же время экстремумы скоростей ветра воспроизводятся не полностью: модель не воссоздает наибольшие скорости, принадлежащие к иному распределению (так называемые драконы, см. (Kislov and Matveeva, 2016)) и, следовательно, имеющие иной генезис (Голицын, 2013). Мезомасштабные региональные модели, обладающие из-за гораздо более детального пространственного разрешения возможностью правильнее описывать циркуляционные особенности, более надежны в этом отношении, однако пока что этот вывод сделан не на основе статистических исследований, а на материалах изучения отдельных случаев (*case studies*).

Методы и материалы

Регион исследования включает прибрежную зону Баренцева, Белого и Карского морей, а также некоторые внутриматериковые районы. Были использованы стандартные срочные станционные измерения температуры воздуха на высоте 2 м, суточные суммы осадков и значения скорости ветра на высоте 10 м, осредненные за 10 минут (см. табл.1). Продолжительность наблюдений различна, поэтому мы использовали данные за период 1966–2013 гг., за который резко уменьшено количество пропусков в наблюдениях. Выбор данного диапазона связан и с тем, что после 1966 года никаких изменений в методиках измерений и обработки осадков не происходило, поэтому их ряды не содержат неоднородностей, связанных с этими изменениями. Мы использовали стандартные данные из базы www.meteo.ru, причем не пытались устранить ошибки измерений, связанные с влиянием ветра, которое, как считается, могут сказываться на точности измерения твердых осадков (Гройсман и др., 2014).

Рассмотрим дискретную двумерную случайную величину X, Y , возможные значения которой есть пары чисел (x, y) , т.е. данные наблюдений на станции или моделирования в определенном узле модельной сетки. Закон распределения задан в виде таблицы с двойным входом, содержащим значения $P_{ij} = P(X = x_i, Y = y_j)$ - вероятность того, что составляющая X приняла значение x_i , а составляющая Y – значение y_j . Закон распределения двумерной случайной величины (X, Y) можно задать в виде функции распределения $F(x, y)$, определяющей для каждой пары чисел (x, y) вероятность того, что X примет значение, меньшее x , и при этом Y примет значение, меньшее y :

$$F(x, y) = P(X < x, Y < y)$$

В данной работе двумерные случайные величины и их функции распределения использованы как основа для исследования статистических особенностей метеорологических величин в интервале температуры около нуля. Были вычислены дифференциальные и интегральные функции распределения веро-

ятностей двумерных случайных величин осадков (суточных сумм) и температуры (среднесуточные значения), а также экстремумов скорости ветра (за последовательные трехсуточные интервалы) и среднесуточных значений температуры в этот же день.

Одним из базовых положений применения статистической теории является условие независимости используемых данных. С практической точки зрения это значит, что, например, последовательно наблюдающиеся экстремумы не должны относиться к одному и тому же циклону или шторму. Добиться независимости можно различными способами, просеивая ряды данных. Мы использовали самый простой метод, при котором для анализа отбирались экстремумы из групп данных, отстоящих на интервал времени, на протяжении которого исчезает связность вариаций. Она определялась по условию уменьшения автокорреляционной функции до статистически незначимого уровня и составила 2-3 суток (для расчетов принято 3 суток). Аналогичные интервалы времени использованы в работах (Cook, 1985; Coles and Walshaw, 1994; Кислов и др., 2015, Kislov and Matveeva, 2016).

Таблица 1. Перечень гидрометеорологических станций, данные которых использованы в работе (см. Булыгина О.Н., Разуваев В.Н., Александрова Т.М., <http://meteo.ru/>)

Название станции	Широта, с.ш.	Долгота, в.д.	Высота над уровнем моря, м
Териберка	69.2	35.1	33
Мурманск	69.0	33.1	55
Ловозеро	68.1	34.8	161
Краснощелье	67.4	37.0	155
Кандалакша	67.1	32.4	26
Умба	66.7	34.3	39
Святой Нос	68.2	39.7	40
Зимнегорский Маяк	65.5	39.8	85

Учитывая специфику задачи, анализ выполнен как по данным для всего года, так и отдельно для событий холодного сезона, к которому в Арктике относятся не только декабрь, январь и февраль, но также логично отнести ноябрь, март и апрель.

Для изучения возможностей воспроизведения особенностей метеорологического режима атмосферными моделями, были использованы данные модели INM-CM4.0 (1.5x2° широты и долготы, для периода времени 1966–2005 гг., (Володин и др., 2013)), полученные в ходе численного эксперимента в рамках протокола CMIP5, Historical experiment (Taylor et al., 2012). Сопоставление данных измерений с результатами моделирования важно для оценки его качества, для того, чтобы ответить на вопрос о том, можно ли по таким результатам воссоздавать реально наблюдающиеся ситуации, в том числе ставить вопрос о прогнозировании их изменчивости при изменениях климата. Для сравнения были использованы модельные данные, относящиеся к узлам модельной сетки, наиболее близко расположенных к станциям. При этом станциям Териберка и Святой Нос, находящимся на побережье Баренцева моря, поставлены в соответствие узлы сетки над прилегающими мор-

скими акваториями, а для станции Зимнегорский Маяк взят не только «морской» модельный узел, но и узел, находящийся на суше (см. табл.2).

Таблица 2. Координаты узлов расчетной сетки модели INMCM4, использованных для сравнения со стационарными данными.

Название станции	Координаты узлов	
	Широта	Долгота
Териберка	69.75	34.0
Мурманск	69.75	32.0
Ловозеро	68.25	34.0
Краснощелье	66.75	38.0
Кандалакша	66.75	32.0
Умба	66.75	34.0
Святой Нос	68.25	40.0
Зимнегорский Маяк (море)	66.75	42.0
Зимнегорский Маяк (суша)	65.25	40.0

Характеристика двумерного случайного процесса «температура – экстремумы скорости ветра»

Рассмотрим пример эмпирического распределения повторяемости экстремумов скорости ветра и температуры (рис.1). Геометрия поверхности функции $P(u, t)$ характеризуется одним максимумом (одномерна), наибольшей повторяемостью отличаются значения диапазона $t \approx +2 \div -8 \text{ }^\circ\text{C}$, $u \approx 12 \div 22 \text{ м/с}$. Подбор теоретической модели, аппроксимирующей двумерное (многомерное) эмпирическое распределение успешно решается только если доказывается (или отвергается) закон нормального распределения. В общем виде восстановить совместное распределение двух величин по их одномерным распределениям невозможно, поэтому другие модели (кроме нормального распределения) практически не разработаны. В данной работе задача выбора теоретической модели не ставится, однако и знание эмпирической функции позволяет решить ряд полезных задач.

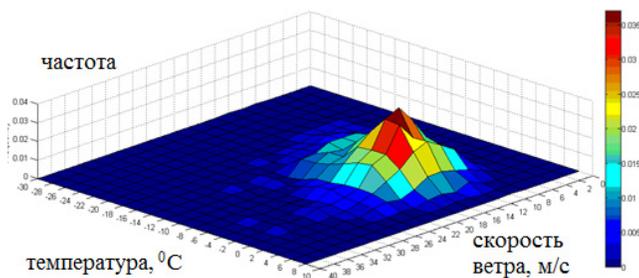


Рисунок 1. Распределение повторяемости случайной величины экстремумов скорости ветра (абсолютных максимумов за трехсуточные интервалы средней 10-минутной скорости ветра) в холодные периоды года (1966 – 2013 гг.) по данным измерений на станции Териберка и значений среднесуточной температуры для этих же суток

Если зафиксировать значение одного из аргументов, например, $Y = y_j$, то полученное распределение величины X называется условным распределением. Рассчитаем условное распределение модулей экстремумов скорости ветра (u) при условии, что температура находится в диапазоне $-2 \div 2 \text{ }^\circ\text{C}$.

Примеры функций, построенных по данным различных станций, представлены на рис.2. Выбранная специальная система координат удобна в случае, если теоретической моделью функции распределения является формула Вейбулла, имеющая, в случае использования интегральной функции распределения вероятностей, следующий вид:

$$F(p) = 1 - \exp(-Ap^k) \quad (1)$$

Поскольку выражение (1) можно преобразовать так

$$\ln[-\ln(1 - F(p))] = k \ln(p + \ln A) \quad (2)$$

то в координатах $\{\ln[-\ln(1 - F(p))], \ln p\}$ распределение Вейбулла представляется прямой линией. Степень отклонения от нее эмпирических точек характеризует, вместе с известными статистическими критериями, применимость данного закона распределения.

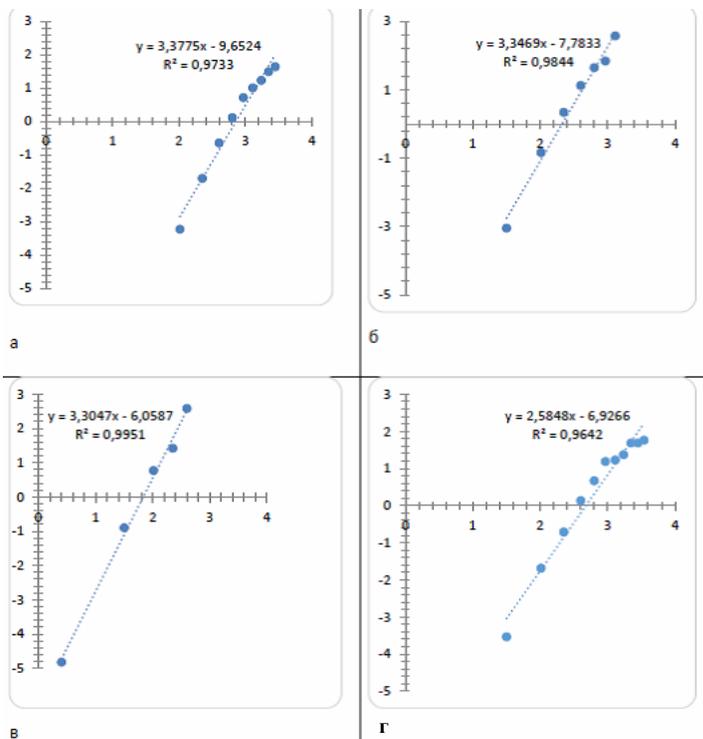


Рисунок 2. Эмпирические условные (при $-2 < t < 2^\circ\text{C}$) распределения выборки абсолютных максимумов за трехсуточные интервалы средней 10-минутной скорости ветра в холодные периоды года (1966 – 2013 гг.) по данным измерений на станциях Териберка (а), Мурманск (б), Краснощелье (в), Зимнегорский Маяк (г), спрямленные на сетке вейбулловского распределения вероятностей.

Коэффициенты детерминации составляют 0,97, 0,98, 0,99 и 0,96, соответственно

Качество аппроксимации точек уравнением прямой линии на рис.2, характеризуемое коэффициентом детерминации, формально очень высокое. Тем не менее, на графиках для станций Териберка и Зимнегорский Маяк видно, что аппроксимация прямой линией не совсем удовлетворительно описывает веро-

ятность появления самых больших скоростей. Анализ аналогичных, но безусловных распределений (Кислов и др., 2015, Kislov and Matveeva, 2016) подсказывает возможность реальности предположения о том, что искривление распределения эмпирических точек означает, что выборка состоит из представителей двух различных распределений, причем каждое из них (поскольку это случай экстремальных значений) может быть аппроксимировано функцией Вейбулла. Таким путем предлагается осуществлять подбор двух независимых друг от друга спрямляющих линий хотя в рассматриваемых случаях точек, отклоняющихся от общего закона, мало для формулировки однозначного вывода.

Эта ситуация продемонстрирована на рис.3. Видно, что каждая группа точек, со значениями больше ($U > U_{th}$) и меньше ($U < U_{th}$) порогового значения хорошо спрямляется в избранной специальной системе координат, характеризуя то, что набор экстремумов сформирован из величин, относящихся к различным генеральным совокупностям. В табл. 3 представлены параметры распределения.

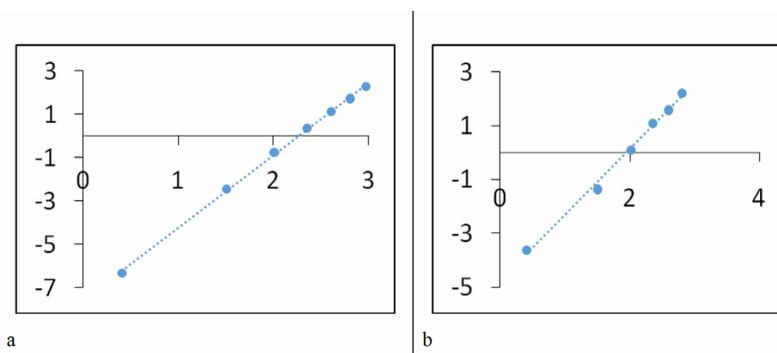


Рисунок 3. Эмпирические условные (при $-2 < t < 2^\circ\text{C}$) распределения выборки абсолютных максимумов за трехсуточные интервалы средней 10-минутной скорости ветра в холодные периоды года (1966 – 2013 гг.) по данным измерений на станции Териберка (а – черные лебеди, $R^2=0.99$, б – драконы, $R^2=0.99$), спрямленные на сетке вейбулловского распределения вероятностей

Плодотворность такого разделения связана не только с более точной аппроксимацией эмпирических функций распределения повторяемостей. Главное - это понимание того, что величины, принадлежащие одному закону распределения, генетически одни и те же (Голицын, 2013), т.е. экстремумы отличаются от своих «менее важных родственников» только амплитудой или степенью воздействия. Н.Тaleb метафорически ассоциировал появление в выборке таких редких экстремумов с черными лебедями в стае белых лебедей (Taleb, 2010). Величины, которые относятся к другому закону распределения, имеют иной генезис, они характеризуют принципиально другие события и были названы драконами, королями или драконами-королями (Sornette, 2009). Внимание акцентируется на том, что драконы — это не лебеди, а иные существа; или же обыгрывается то, что короли стоят неизмеримо выше обыкновенных людей по богатству и общественному положению. Не вдаваясь в об-

суждение того, насколько уместна такая терминология, обратим внимание, что с помощью этих метафор удобно разделять события, принадлежащие разным законам Вейбулла, поэтому мы будем применять ее в дальнейшем

Отделить друг от друга драконы и черные лебеди в некоторых случаях (относящихся к различным областям естественных и экономических наук) сложно (Sornette, 2009, 2012), поэтому для осуществления данной операции разработаны статистические критерии (Wheatley and Sornette, 2015). В данном случае мы идем по пути интерпретации, подсказанной нашими предыдущими работами (Kislov and Matveeva, 2016), и в использовании специальных критериев нет необходимости.

Таблица 3. Параметры распределения Вейбулла, рассчитанные отдельно для двух групп экстремумов скорости ветра, отвечающих черным лебедям и драконам (для значений скоростей в м/с), в случае безусловного и условного (для диапазона $-2 \div +2^\circ\text{C}$) распределения вероятностей

Станция	Принадлежность к семейству	Безусловное распределение (холодный сезон (Kislov and Matveeva, 2016)*)		Условное распределение	
		k	A	k	A
Териберка	черные лебеди	3.97	0.000016	4.13	1.0E-05
	драконы	1.77	0.0120	1.96	0.0061
Мурманск	черные лебеди	3.95	0.0001	3.35	0.0004
	драконы	1.34	0.1039	-	-
Ловозеро	черные лебеди	3.19	0.0013	2.87	0.0032
	драконы	1.69	0.0429	-	-
Краснощелье	черные лебеди	3.14	0.0043	3.31	0.0023
	драконы	0.99	0.4608	-	-
Кандалакша	черные лебеди	3.50	0.0017	2.12	0.0268
	драконы	1.22	0.2322	-	-
Умба	черные лебеди	3.63	0.0006	3.64	0.0005
	драконы	1.70	0.0508	-	-
Святой Нос	черные лебеди	4.85	0.000002	4.21	1.4E-05
	драконы	1.59	0.017	0.74	0.4000
Зимнегорский Маяк	черные лебеди	3.50	0.00015	3.20	0.00026
	драконы	1.13	0.1125	1.31	0.0583

* фактически это тоже условное распределение для значений температуры, встретившихся в холодные сезоны

Рассмотрим результаты моделирования. Для анализа были взяты соответствующие станции узлы модельной сетки (см. табл.2) На рис.4 показаны примеры эмпирических значений условных повторяемостей, спрямленные на вейбулловской сетке. Видно, что распределение экстремумов подчиняется

Вейбулловскому распределению. Однако, сравнение с аналогичными графиками, аппроксимирующими данные наблюдений (рис. 2) показывает, что здесь явно наблюдаются представители одного и того же семейства, т.е. это черные лебеди, а драконы отсутствуют в принципе..

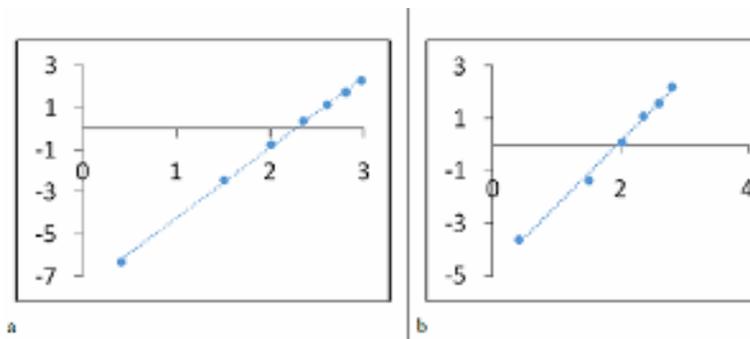


Рисунок 4. Модельные условные (при $-2 < t < 2^{\circ}\text{C}$) распределения выборки абсолютных максимумов за трехсуточные интервалы средней 10-минутной скорости ветра в холодные периоды года (1966 – 2013 гг.) по данным измерений на станциях Териберка (а) и Зимнегорский Маяк (б) спрямленные на сетке вейбулловского распределения вероятностей. Коэффициенты детерминации превышают 0.99 в обоих случаях

На рис.5 сопоставлены параметры условного (для диапазона $-2^{\circ}\text{C} \div +2^{\circ}\text{C}$) распределения вероятностей Вейбулла, рассчитанные по данным наблюдений (случай черных лебедей, см. табл.3) и в результате численного эксперимента модели INM-СМ4. Видно, что за исключением лишь нескольких точек значения занимают примерно один и тот же полигон области параметров (так, по данным наблюдений «выпадает» Кандалакша, а по результатам моделирования – Зимнегорский Маяк, причем оба модельных узла, относящиеся как к су-ше, так и к морю). Это говорит в целом о том, что модельное качество воспроизведения экстремальных скоростей ветра в диапазоне около нуля градусов достаточно высокое.

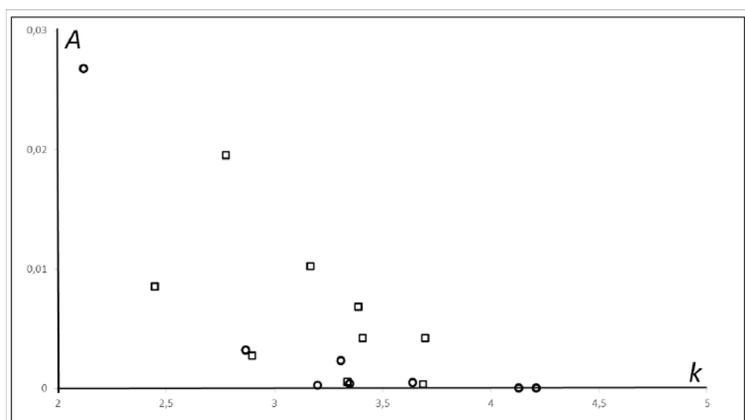


Рисунок 5. Сопоставление параметров вейбулловского распределения по данным наблюдений на станциях (круги) и воспроизведенных моделью INM СМ4 (квадраты) в аналогичных им узлах сетки

Характеристика двумерного случайного процесса «температура – осадки»

Для характеристики двумерного случайного процесса температуры и осадков была рассчитана его интегральная функция распределения. Используя ее можно определить такую полезную характеристику двумерного случайного процесса как вероятность (повторяемость) попадания случайной точки (X, Y) в пределы прямоугольника, определенного значениями $x_{i-1} < X \leq x_i, y_{j-1} < Y \leq y_j$. А именно,

$$P(x_{i-1} < X \leq x_i, y_{j-1} < Y \leq y_j) = F(x_i, y_j) - F(x_i, y_{j-1}) - F(x_{i-1}, y_j) + F(x_{i-1}, y_{j-1}) \quad (3)$$

В таблице 4 представлены вероятности попадания случайной точки в интервал, включающий все осадки (от нулевых до максимальных наблюдавшихся значений), и по температуре $-6 \div 6^\circ\text{C}$ (последний интервал характеризует условия «около 0°C »). Отметим важный методический момент: как было отмечено, ряды суточной дискретности были искусственно прорежены так, что было взято каждое третье значение. При этом для анализа были сгенерированы выборки, которые включали в себя элементы исходных рядов с номерами: 1, 4, 7, ... (серия I), или с 2, 5, 8, ... (II), или с 3, 6, 9, ... (III). В силу принятой гипотезы о том, что при этом достигается независимость результатов, статистические характеристики должны получаться одинаковыми. Сравнение результатов, относящихся к I, II, III действительно в подавляющем большинстве случаев подтверждает этот тезис, а некоторые различия связаны с включением/исключением редко встречающихся экстремальных значений, присутствие/отсутствие которых может немного изменить значения вероятности между разными сериями. В табл. 4 представлены значения искомого выражения (3), вычисленные для трех серий, и средние по ансамблю величины.

Таблица 4. Вероятность попадания значений температуры в диапазон $-6 \div 6^\circ\text{C}$ и осадков в диапазон всех значений по данным различных станций в сериях I, II, III

Название станции	Вероятность			
	I	II	III	Средняя
Териберка	0.073	0.074	0.077	0.075
Мурманск	0.066	0.070	0.066	0.067
Ловозеро	0.033	0.036	0.035	0.035
Краснощелье	0.064	0.067	0.075	0.069
Кандалакша	0.072	0.069	0.070	0.070
Умба	0.070	0.079	0.077	0.075
Святой Нос	0.077	0.075	0.079	0.077
Зимнегорский Маяк	0.051	0.053	0.051	0.052

Сравнивая данные, относящиеся к различным станциям (расположенным как на побережье Баренцева и Белого морей, так и в нескольких сотнях км от побережий) можно отметить, что в большинстве случаев вероятность составляет 0.070 – 0.075. Исключением являются данные двух станций, причем особенно выбивается значение, полученное по станции Ловозеро. Причины не

ясны, во всяком случае, эта станция не отличается чем-то особенным, например, от Краснощелья, особенно в холодный период времени, когда крупное озеро Ловозеро покрыто льдом.

Аналогичным образом были обработаны данные математического моделирования климатического режима по модели INM-CM4. Функции распределения охватывают меньший диапазон значений (особенно в осадках) по сравнению с эмпирическими данными. В табл. 5 показаны результаты расчетов, осуществленные по формуле (3).

Таблица 5. Вероятность попадания значений температуры в диапазон $-6 \div 6^\circ\text{C}$ и значений осадков в диапазон всех значений по данным модели INM-CM4 в модельных узлах, близко расположенных к соответствующим станциям

Положение расчетного узла, расположенного вблизи станций	Вероятность (средняя по трем сериям – см. табл. 3)
Териберка	0.163
Мурманск	0.167
Ловозеро	0.087
Умба	0.070
Святой Нос	0.109
Зимнегорский Маяк (модельный узел на суше)	0.069
Зимнегорский Маяк (модельный узел над морем)	0.082

Сравнивая данные табл. 4 и 5 можно отметить, что модельные значения несколько чаще оказываются в рассматриваемом интервале (особенно это заметно для Териберки и Мурманска), т.е. модель несколько чаще, чем в реальности, диагностирует условия около нуля.

Перейдем к условным распределениям осадков (p). Они, при условии, что температура находится в диапазоне $-2 \div 2^\circ\text{C}$, отлично аппроксимируются функцией Вейбулла (рис.6). Естественно, что можно применять и другие экстремальные распределения, например, гамма-распределение см. (Bulygina et al., 2007; Матвеева и др. 2015; Золина, Булыгина, 2016).

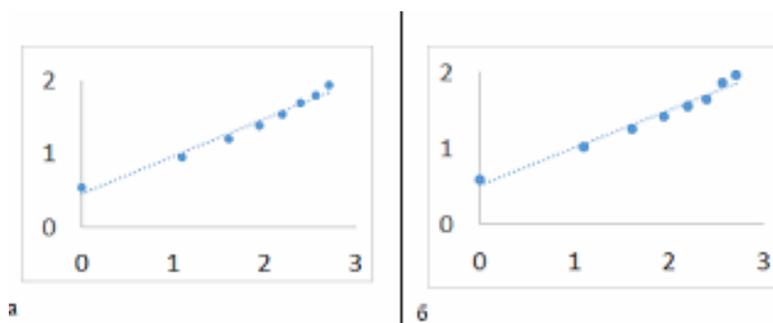


Рисунок 6 (а, б). Эмпирические распределения условного распределения суточных сумм осадков при условии, что температура находится в диапазоне $-2 \div 2^\circ\text{C}$ за трехсуточные интервалы в 1966 – 2015 гг. по данным измерений на станциях Териберка (а), и Святой Нос (б), спрямленные на сетке вейбулловского распределения вероятностей $(\ln[-\ln(1-F(p))], \ln p)$.

Коэффициенты детерминации составляют 0.98 и 0.97 для случаев а и б

То, что теоретическая модель служит прекрасной аппроксимацией эмпирического распределения подтверждает очень большой коэффициент детерминации и выполненные (на основе критерия Колмогорова) оценки соответствия эмпирического распределения теоретической функции распределения вероятностей (об особенностях проверки в данном случае нулевой гипотезы см. (Kislov and Matveeva, 2016)). Обработка данных всех рассматриваемых станций (см. табл. 6) показала аналогичные результаты с точки зрения соответствия эмпирических распределений распределению Вейбулла. Следует обратить внимание на то, что средние величины (оцененные по теоретическому соотношению – см. табл.6) оказываются во всех случаях порядка 1 мм, т.е. весьма невелики и различаются в пределах региона очень мало.

Надежно определяемые параметры распределения позволяют провести аналитически расчёт квантильных значений. Для этого формула (1) преобразуется к следующему виду:

$$p(p^*) = \left[\frac{1}{A} \ln \frac{1}{1-p^*} \right]^{1/k}$$

где: p^* — пороговое значение вероятности; $p(p^*)$ — есть соответствующее квантильное значение осадков.

Вычисленные по данным всех станций квантильные значения $p(0.99)$ составляют порядка 10 мм (см. табл. 6): они чуть меньше на побережье Баренцева моря (скорее всего, просто потому, что это более «высокоширотные» станции, с преобладающим господством более холодных воздушных масс, содержащих меньше водяного пара).

Таблица 6. Коэффициент детерминации и параметры распределения Вейбулла для аппроксимации условного распределения вероятностей суточных сумм осадков, измеренных на метеорологических станциях

Название станции	Параметры				
	R ²	A	k	Среднее значение, мм: $A^{-1/k} \Gamma(1+1/k)$ *	$p(0.99)$, мм
Териберка	0.98	1.573	0.51	0.8	8
Мурманск	0.97	1.558	0.46	0.9	11
Ловозеро	0.92	1.930	0.36	0.7	11
Краснощелье	0.96	1.253	0.54	1.2	11
Кандалакша	0.97	1.100	0.60	1.3	11
Умба	0.96	1.157	0.57	1.2	11
Святой Нос	0.97	1.667	0.50	0.7	8
Зимнегорский Маяк	0.98	1.643	0.49	0.8	8

* Γ – гамма-функция.

В табл. 7 представлены величины, воспроизведенные климатической моделью. Как средние, так и квантильные значения несколько превосходят аналогичные характеристики, оцененные по данным наблюдений (аналогичный результат получен и с точки зрения оценок вероятности попадания в область – см. выше), однако с практической точки зрения эти отличия ничтожны. В этом

смысле можно сделать вывод о том, что качество моделирования достаточно высокое и может применяться для осуществления практически важных прикладных расчетов.

Таблица 7. Коэффициент детерминации и параметры распределения Вейбулла для аппроксимации условного распределения вероятностей суточных сумм осадков, вычисленных моделью INMCM4 в узлах модельной сетки, расположенных вблизи метеорологических станций

Название станции	R ²	Параметры			
		A	k	Среднее значение, мм: $A^{-1/k} \Gamma(1+1/k)$	$p(0.99)$, мм
Териберка	0.99	0.921	0.70	1.4	10
Мурманск	0.99	0.960	0.66	1.4	11
Ловозеро	0.97	0.976	0.59	1.6	14
Умба	0.98	0.986	0.60	1.5	13
Святой Нос	0.97	1.229	0.56	1.1	11
Зимнегорский Маяк (модельный узел на суше)	0.99	1.140	0.57	1.3	12
Зимнегорский Маяк (модельный узел над морем)	0.99	1.151	0.54	1.4	13

Даты устойчивого перехода температуры весной и осенью в Мурманске, Териберке и Кандалакше в период 1950-2015 гг.

Даты устойчивого перехода через 0°C являются важной характеристикой рассматриваемых метеорологических условий. Они определялись по ежедневным данным метеорологических станций. Для определения дат предварительно были рассчитаны средние по десятилетиям значения для каждого дня года. Даты устойчивого перехода средней суточной температуры воздуха через различные градации рассчитывались по методике, предложенной Д.А. Педем (Педь, 1951). Днем устойчивого перехода температуры воздуха через определенные границы принимается тот день, после которого обратного перехода не наблюдается, а если он был, то короткие периоды относились весной к похолоданию, а осенью – к потеплению. Эта методика была апробирована в работах (Козельцева, Педь, 1987; Садоков и др., 2012).

Вычисления, проведенные для станций Мурманск, Териберка, Кандалакша и др., показали, что для периода 1950-2015 гг. даты весеннего перехода становятся, в целом, более ранними, а даты осеннего перехода, наоборот, более поздними (см. рис.7). Причем сопоставление с величиной стандартного отклонения показывает, что сигнал потепления, выраженный в изменении дат, оказывается статистически значимым. Это означает увеличение продолжительности периода положительных температур. Так, для Мурманска, его средняя продолжительность равна 180 суток, а в последнее десятилетие она уже выросла на две недели.

Средние по наблюдениям даты (номера дня в году, отсчитываемые от 1 января) осенних переходов через 0°C составили: 310, 301 и 328 для Териберки,

Мурманска и Кандалакши, а даты весенних переходов – 124, 121 и 93, соответственно.

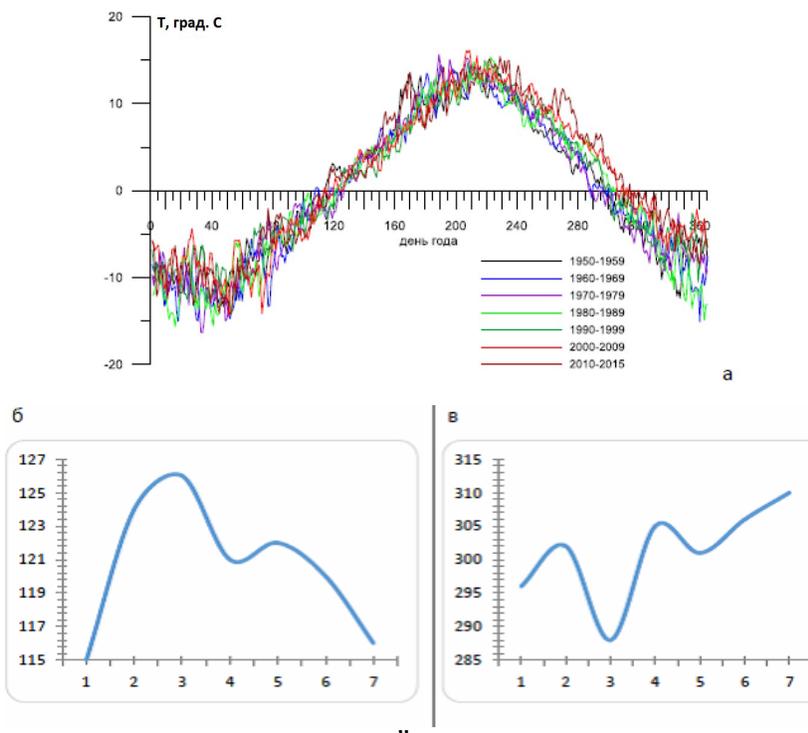


Рисунок 7. Средняя суточная температура воздуха Мурманска, осредненная по 7 десятилетиям (а), и изменения весенней (б) и осенней (в) средней даты (номер дня в году) перехода через ноль градусов в последовательные семь десятилетий (ось абсцисс), перечисленные на рис.7а

Средние по наблюдениям даты (номера дня в году, отсчитываемые от 1 января) осенних переходов через 0°C составили: 310, 301 и 328 для Териберки, Мурманска и Кандалакши, а даты весенних переходов – 124, 121 и 93 соответственно.

Климатический прогноз изменения сроков перехода средней суточной температуры через 0°C по результатам расчетов модели INM CM4 по сценарию RCP8.5 в рамках международного проекта CMIP5

Принимая во внимание то, что модель INMCM4 показала достаточно надежные результаты по воспроизведению метеорологического режима в диапазоне около 0°C , ее данные можно использовать для комплексной оценки изменений даты перехода через ноль и длины теплого (холодного) периода при изменениях климата.

По результатам моделирования были рассчитаны новые (прогностические) даты перехода через 0°C по сценарию RCP8.5 в рамках международного проекта CMIP5. Этот климатический прогноз получается путем добавления

модельной аномалии к средней величине, оцененной по наблюдениям за базовый период, который выбран в соответствии с рекомендациями ВМО как 1960-1989 гг. Сценарий RCP8.5 взят потому, что это – самый жесткий сценарий, так что результаты его использования представляют собой своеобразную «оценку сверху» возможных аномалий. Тем не менее, принципиальные отличия от других сценариев становятся заметны только в конце столетия. Для моделирования условий середины столетия это не так важно, здесь области неопределенности различных сценариев еще пересекаются между собой.

Таблица 8. Прогноз изменений дат устойчивого перехода через 0°C для середины и конца XXI века по данным модели INMCM4 в рамках сценария RCP8.5

Положение расчетного узла, расположенного вблизи станций	Период прогноза, годы	Весенний переход через 0°C, номер дня года	Осенний переход через 0°C, номер дня года
Териберка		Прогноз изменения количества суток	
	2046-2065	-30	12
	2081-2100	-59	42
		Прогноз номера дня в году	
	2046-2065	74	322
2081-2100	65	352	
Мурманск		Прогноз изменения количества суток	
	2046-2065	-17	3
	2081-2100	-36	45
		Прогноз номера дня в году	
	2046-2065	104	304
2081-2100	85	346	
Кандалакша		Прогноз изменения количества суток	
	2046-2065	-10	3
	2081-2100	-23	13
		Прогноз номера дня в году	
	2046-2065	83	331
2081-2100	70	341	

При потеплении климата естественно ожидать сдвиг дат осеннего и весеннего переходов через 0°C, причем к концу XXI века диапазон положительных температур должен быть выше, чем в середине столетия. Эти особенности, разумеется, воспроизведены и в численном эксперименте (табл. 8), однако кроме этого получен ряд интересных особенностей. Так, в середине столетия на всех рассмотренных станциях сдвиг дат весной гораздо больше, чем осенью. В конце столетия этот эффект менее заметен. Что касается абсолютных значений, то особенно впечатляющим явилось увеличение периода положительных температур на побережье Баренцева моря, где к концу столетия оно составляет порядка 100 суток! Фактически получается, что температура устойчиво переходит через 0°C лишь в середине декабря и возвращается в область положительных температур уже в конце февраля. В Мурманске эти изменения также очень существенны, они составляют ~80 суток, в то время как в Кандалакше только около 1 месяца. Возможно, что здесь находит отражение происходящая к концу столетия принципиальная перестройка термиче-

ского режима вод Баренцева моря, создающая длительное инерционное воздействие на прибрежные территории, в то время как в более континентальных районах зимние условия претерпевают не столь большие изменения.

Заключение

Изучение особенностей метеорологического режима в диапазоне температур около 0°C, выполненное для условий Западной части Российской Арктики (Кольский полуостров), проведено с точки зрения анализа различных показателей. В том числе, использование двумерных функций распределения позволило сопоставить результаты моделирования с эмпирическими данными, рассматривая величину вероятности попадания значения в заданный диапазон значений и сравнивая условные функции распределения.

Так, изучение условных распределений (в диапазоне температур около 0°C) осадков и модуля скорости ветра показало, что в обоих случаях характерен закон Вейбулловского распределения, однако в *условном* распределении повторяемости скорости ветра ощущается присутствие как черных лебедей, так и драконов; в то время как все значения осадков определяются единым законом. Климатическая модель, как и для случая безусловных распределений, не воспроизводит аномалии скорости ветра, относящиеся к классу драконов.

За исключением этой особенности, не играющей в диапазоне «около нуля» принципиального значения, получено, что в целом модель INM-CM4 близко к реальности воссоздает значения осадков и скорости ветра в диапазоне около 0°C.

Изучение дат устойчивого перехода через 0°C показало, что в современных условиях потепления климата они в среднем смещаются, так что интервал положительных температур в среднем увеличивается (а холодных температур – уменьшается). Используя данные климатической модели INM-CM4 удалось (в рамках сценария RCP8.5) показать, что при потеплении климата к середине и концу XXI века происходит сдвиг дат осеннего и весеннего переходов через 0°C, причем к концу XXI века диапазон положительных температур существенно больше, чем в середине столетия. В середине столетия более заметен сдвиг осенних дат, чем весенних. В конце столетия эта асимметрия существует, но выражена в меньшей степени. В целом интервал между устойчивыми переходами через 0°C увеличивается к середине столетия от двух недель до полутора месяцев, а в конце столетия – от одного месяца до двух с половиной месяцев в направлении с юга на север (поперек Кольского полуострова).

Благодарности

Данное исследование выполнено в рамках Г/Б темы: АААА-А16-116032810086-4 и при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 14-37-00038).

Список литературы

Булыгина О.Н., Разуваев В.Н., Александрова Т.М. Описание массива данных суточной температуры воздуха и количества осадков на метеорологических станциях России и бывшего СССР (ТТТР). – Электронный ресурс. URL: <http://meteo.ru/data/162-temperature-precipitation#описание-массива-данных>.

Володин Е.М., Дианский Н.А., Гусев А.В. 2013. Модель земной системы INMCM4: воспроизведение и прогноз климатических изменений в 19-21 веках. — Известия РАН. Физика атмосферы и океана, т. 49, № 4, с.379–400.

Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме. 2014. - М., 58 с.

Голицын Г.С. 2013. Статистика и динамика природных процессов и явлений. — М., URSS, 398 с.

Гройсман П. Я., Богданова Е. Г., Алексеев В. А., Черри Ж. Е., Булыгина О. Н. 2014. Влияние погрешности в измерениях снегопадов на суммы атмосферных осадков и их тренды по Северной Евразии. — Лед и снег, т. 54, № 2, с. 29–43, doi: 10.15356/2076-6734-2014-2-29-43.

Золина О.Г., Булыгина О.Н. 2016. Современная климатическая изменчивость характеристик экстремальных осадков в России. - Фундаментальная и прикладная климатология, № 1, с. 84-103. doi: 10.21513/2410-8758-2016-1-84-103.

Кислов А.В., Матвеева Т.А., Платонов В.С. 2015. Экстремумы скорости ветра в Арктике. - Фундаментальная и прикладная климатология, № 2, с. 63-80.

Кислов А. В., Матвеева Т. В., Платонов В. С. 2016. Общее описание изменчивости опасных погодных явлений в Арктике. – В кн.: «Меняющийся климат и социально-экономический потенциал Российской Арктики», т. 2. — Москва, Лига-Вент, с.10–45.

Козельцева В.Ф., Педь Д.А. 1987. Данные о весенних датах устойчивого перехода средней суточной температуры воздуха через $0^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ по станциям западной части территории СССР. – Обнинск, ВНИИГМИ-МЦД, 59 с.

Матвеева Т.А., Гущина Д.Ю., Золина О.Г. 2015. Крупномасштабные индикаторы экстремальных осадков в прибрежных природно-экономических зонах европейской территории России. - Метеорология и гидрология, № 11, с. 20–32.

Пальмен Э., Ньютон Ч. 1973. Циркуляционные системы атмосферы. - Л., Гидрометеиздат, 616 с.

Педь Д.А. 1951. Об определении дат устойчивого перехода температуры воздуха через определенные значения. - Метеорология и гидрология, № 10, с. 38–39.

Садоков В.П., Козельцева В.Ф., Кузнецова Н.Н. 2012. Определение весенних дат устойчивого перехода средней суточной температуры воздуха через $0 \div +5^{\circ}\text{C}$, их прогноз и оценка. - Труды Гидрометцентра России, вып. 348, с. 162–172.

Суркова Г.В. 2015. Климатические ресурсы современного климата в середине и конце 21 века как основа прогноза социально-важных показателей в Арктике. - В кн. «Меняющийся климат и социально-экономический потенциал Российской Арктики», т. 2. – Москва, Лига-Вент, с. 7-20.

Суркова Г.В., Соколова Л.А., Чичев А.Р. 2015. Многолетний режим экстремальных значений скорости ветра в Баренцевом и Карском морях. - Вестник Московского университета. Серия 5: География, № 5, с. 54-59.

De Boer G., Chapman W., Kay J., Shupe E M., S.Vavrus S., and Walsh J. 2012. Characterization of the present-day arctic atmosphere in CCSM4. – J. Climate, vol. 25, p. 2676-2695. doi: 10.1175/JCLI-D-11-00228.1

Bulygina O. N., Razuvaev V. N., Korshunova N. N., Groisman, P. Ya. 2007. Climate variations and changes in extreme climate events in Russia. - Environ. Res. Lett., vol. 2, No. 4, 045020, 7 p. doi:10.1088/1748–9326/2/4/045020.

Cook N.J. 1985. The Designer’s Guide to wind loading of building structures. Part 1: Background, damage survey, wind data and structural classification. — London, Building Research Establishment, Garston and Butterworths, 371 p.

Coles S.G., Walshaw D. 1994. Directional modelling of extreme wind speeds. — Applied Statistics, pp. 139–157.

Donat M.G., Lowry A.L., Herold N., Dittus A.J. 2016. Temperature and precipitation extremes in century-long gridded observations, reanalyses, and atmospheric model simulations. doi: 10.1002/2016JD025480. This article has been accepted for publication.

Donat M.G., Lowry A.L., Alexander L.V., O’Gorman P.A. Maher N. 2016. More extreme precipitation in the world’s dry and wet regions. - Nature Climate Change, vol.6, pp. 508–513. doi:10.1038/nclimate2941

Frich P., Alexander L. V., Della-Marta P., Gleason B., Haylock M., Tank A. M. G. K., and Peterson T. 2002. Observed coherent changes in climatic extremes during the second half of the twentieth century. - Climate Res., vol. 19, pp. 193–212.

Hanesiak J., Stewart R., TayLor P., Moore K., Barber D., McBean G., Strapp W., Wolde M., Goodson R., Hudson E., Hudak D., Scott J., Liu G., Gilligan J., Biswas S., Desjardins D., Dyck R., Fargey S., Field R., Gascon G., Gorgon M., Greene H., Hay C., Henson W., Hochheim K., Laplante A., Martin R., MeLzer M., and Zhang S. 2010. Storm studies in the Arctic (STAR). - Bulletin of the American Meteorological Society, pp. 48-68. doi:10.1175/2009BAMS2693.1

Kislov A. and Matveeva T. 2016. An extreme value analysis of wind speed over the european and siberian parts of arctic region. - Atmospheric and Climate Sciences, vol. 6, pp. 205-223. URL: <http://dx.doi.org/10.4236/acs.2016.62018>

Pfahl S., Wernli H. 2012. Quantifying the relevance of cyclones for precipitation extremes. - J. Climate, vol. 25, pp. 6770-6780. doi: 10.1175/JCLI-D-11-00705.1

Sornette D. 2009. Dragon-Kings, Black Swans and the prediction of crises. — International Journal of Terra space Science and Engineering, No 2 (1), pp. 1–18.

Sornette D. and Ouillon G. 2012. Dragon-kings: mechanisms, statistical methods and empirical evidence. - European Physical Journal, Special Topics 205, pp. 1-26.

Taleb N.N. 2010. The black swan: The impact of the highly improbable fragility. - New York, Random House, 300 p.

Taylor K.E., Stouffer R.J. and Meehl G.A. 2012. An overview of CMIP5 and the experiment design. — Bulletin of the American Meteorological Society, vol. 93, No 4, pp. 485–498.

Trenberth K. E., Dai A., Rasmussen R. M., Parson D. B., 2003. The changing character of precipitation. - Bulletin of the American Meteorological Society, vol. 84, pp. 1205–1217.

Wheatley S. and Sornette D. 2015. Multiple outlier detection in samples with exponential & Pareto tails: redeeming the inward approach & detecting dragon kings (August 17, 2015). Swiss Finance Institute Research Paper No. 15-28. Available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=2645709> or <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.2645709>.

Статья поступила в редакцию: 30.11.2017

После переработки: 03.03.2017