

ЭКСТРЕМУМЫ СКОРОСТИ ВЕТРА В АРКТИКЕ

А.В. Кислов¹⁾, Т.А. Матвеева¹⁾, В.С. Платонов¹⁾

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

Резюме. Экстремальные скорости ветра были исследованы по различным данным в регионе, простирающемся вдоль арктического побережья от Кольского полуострова до полуострова Таймыр. Были использованы данные стационарных наблюдений, материалы реанализа (20th Century Reanalysis) и результаты моделирования климата в рамках модели INM-CM4 (модель Института вычислительной математики РАН). Показано, что массив экстремумов, определенных по данным наблюдений, содержит данные, принадлежащие к двум различным генеральным совокупностям, каждая из которых надежно описывается распределением Вейбулла. Используя специальную метафорическую терминологию, эти наборы экстремумов названы «черными лебедями» и «драконами», причем за наибольшие экстремумы отвечают именно «драконы», превосходящие «черных лебедей» на 10-30% (при одном и том же квантильном уровне 0,99). Данные модели INM-CM4 и реанализа «драконов» не содержат. Это значит, что они занижают экстремальные значения и, кроме того, важный циркуляционный механизм, создающий эти аномалии, не воспроизводится. Чтобы оценить, связано ли это с пространственным разрешением моделей, была применена мезомасштабная региональная модель COSMO-CLM для моделирования типичных ситуаций. Она оказалась способна воспроизводить скорости, того же порядка, что наблюдались на станциях. Это указывает на важную роль мезометеорологических эффектов при возникновении экстремальных скоростей ветра, однако механизмы изучены недостаточно полно.

Ключевые слова. Экстремумы скорости ветра, закон Вейбулла, экстремумы в Арктике, моделирование экстремальных ситуаций, «черные лебеди» и «драконы».

WIND SPEED EXTREMES IN ARCTIC AREA

A.V. Kislov¹⁾, T. A. Matveeva¹⁾, V. S. Platonov¹⁾

¹⁾ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography,
Department of Meteorology & Climatology
119991, Moscow, Lenin Gory, 1, avkisllov@mail.ru

Summary. Changes in wind speed extremes along the Arctic coast (from the Kola Peninsula, north part of the Scandinavia, to the Taimyr Peninsula) were investigated through extreme value analysis of wind speed obtained from the 20th Century Reanalysis dataset and wind simulations of the INM-CM4 climate model, as well as using observed data from several stations. The analysis showed that the set of wind speed extremes obtained from observations is a mixture of two different subsets each neatly described by the Weibull distribution. Using special metaphoric

terminology, they are labeled as “black swans” and “dragons”. The “dragons” are responsible for strongest extremes. They exceed “black swans” by up to 10-30% (at the same quantile threshold 0,99). Both reanalysis and INM-CM4 data have no “dragons”. This means that such models underestimate wind speed maxima, and the important circulation process generating the anomalies is not simulated. To assess whether it depends on spatial resolution of models, the meso-scale COSMO-CLM regional model was used for modelling the typical situations. It showed the ability to simulate wind speed values of the same order that was observed at the stations. This means that meso-meteorological effects play an important role in the generation of extreme values of wind speed. However, a respective mechanism is not explored sufficiently.

Keywords. Wind speed extremes, Weibull law, extremes in Arctic region, modelling of extreme events, “black swans” and “dragons”.

Введение

Информация об экстремально больших скоростях ветра очень важна, поскольку ветровые нагрузки требуется знать при проектировании и эксплуатации антенн и мачт, мостов, ветроэнергетических установок, высотных домов, объектов рекламы, фуникулёрных трасс и др. На морской акватории и побережьях в этот перечень добавляются портовые сооружения, корабли и буровые установки. При этом анализируется только модуль скорости, направление ветра не принимается во внимание. Это, конечно, ограничение, однако, оно во многом вынужденное. Дело в том, что большие аномалии в принципе очень редки, и если попытаться разделить выборку модулей скорости на несколько (даже широких) угловых секторов, то надежность статистических показателей станет малообеспеченной. В то же время, если не ставить вопрос именно об экстремальных скоростях ветра, то учет направления делает исследование более полным — см. (Методы..., 2009).

Максимальные скорости ветра у поверхности происходят за счет транспортировки вниз, из верхней части пограничного слоя, частиц воздуха с большими скоростями (Brasseur, 2001). Это может быть выражено в опускании вниз ядра нижнетропосферного струйного течения, проявления мезомасштабных явлений, таких, как торнадо, бора и др., или иметь характер нерегулярных флуктуаций. В любом случае, речь идет о достаточно короткоживущих аномалиях, связанных, однако, с синоптическими процессами.

В основе статистической теории экстремумов (Fisher and Tippett, 1928; Gnedenko, 1943) лежит представление о том, что экстремальные одинаково распределенные независимые случайные величины подчиняются одному из трех распределений вероятностей, причем, для аппроксимации распределения экстремумов скорости ветра успешно применяется одно из них — закон Вейбулла (Palutikof et al, 1999; Рожков, 2001). Другим подходом к исследованию экстремальных величин является методика аппроксимации не всего распределения, а только его хвоста. Для этого применяется так называемое распределение Парето, которому подчиняются вероятности событий, интен-

сивность (амплитуда) которых превосходит некоторое пороговое значение (Palutikof et al, 1999; Brabson and Palutikof, 2000).

Настоящая статья посвящена изучению аномальных особенностей ветрового режима западной части русской Арктики — наиболее динамично развивающемуся заполярному региону России. Это исследование особенно актуально в современных условиях, поскольку обнаружено, что частота экстремальных явлений возрастает (Второй оценочный ..., 2014). Однако, нет четкого ответа на вопрос о том, связано ли учащение аномалий с глобальным потеплением и каков характер этой связи. Продвижение в данном направлении очень важно в контексте климатического прогноза. Поскольку он основан на использовании данных моделирования, то возникает необходимость оценки потенциальной возможности воспроизведения экстремальных явлений атмосферными моделями.

Методы и материалы

Регион исследования включает прибрежную зону Баренцева, Белого и Карского морей, а также некоторые внутриматериковые районы. Были использованы стандартные срочные станционные измерения скорости ветра на высоте 10 м, осредненные за 10 минут (см. табл.1). Продолжительность наблюдений различна, поэтому мы использовали, главным образом, данные за период 1966–2013 гг.

Сразу отметим, что в данных наблюдений иногда (редко) встречаются очень большие скорости (60–90 м/с). Такие значения, в принципе, не запрещены, однако нельзя исключить возможность ошибок. Поэтому была организована косвенная проверка правдоподобия этих данных для некоторых станций, основанная на исследовании режима скоростей в сроки, следующие за экстремальным значением и ему предшествующие. Поскольку речь идет не о порывах, а об осредненных значениях, то максимумы скоростей, пусть и не столь большие, генетически связанные с циклоническими или фронтальными явлениями, должны проследиваться в течение нескольких часов. Однако было установлено, что это были именно выбросы на фоне относительно спокойных условий, так что данная информация выглядит ошибочной.

В дополнение к данным наблюдений для анализа аномалий ветра был использован реанализ *20th Century Reanalysis*, $1,9 \times 1,875^\circ$ по широте и долготе, 1979–2004 гг., (Compo et al, 2006; Compo et al, 2011; Lindsay et al, 2014). Было выяснено, что данные реанализа (3-х часовые значения, отнесенные к высоте измерений 10 м) таких огромных скоростей не содержат. Поэтому кажется логичным решение исключить из анализа сверхбольшие скорости. Однако, как будет показано далее, в некоторых случаях их появление возможно.

Как было отмечено, одним из базовых положений теории является условие независимости данных. С практической точки зрения, 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 выбирался абсолютный максимум за интервал времени в 3 суток). Аналогичные интервалы времени использованы в работах (Cook, 1985; Guscilla, 1991; Coles and Walshaw, 1994).

Таблица 1 – Перечень гидрометеорологических станций, данные которых использованы в работе (<http://meteo.ru/>)

Название станции	Широта	Долгота	Высота над уровнем моря	Интервал наблюдений, использованный для анализа
Териберка	69,2	35,1	33	1966–2013
Мурманск	69	33,1	55	1936–2013
Ловозеро	68,1	34,8	161	1936–2013
Краснощелье	67,4	37,0	155	1932–2013
Кандалакша	67,1	32,4	26	1936–2013
Умба	66,7	34,3	39	1936–2013
Архангельск	64,6	40,5	3	1890–2013
Зимнегорский Маяк	65,5	39,7	85	1936–2013
Канин Нос	68,7	43,3	48	1966–2013
Колгуев Северный	69,5	49,1	23	1966–2013
Коткино	67	51,2	18	1966–2013
Нарьян-Мар	67,7	53,0	4	1966–2013
Усть-Уса	65,9	56,9	77	1966–2013
Усть-Цильма	65,4	52,3	78	1895–2013
Окунев Нос	66,3	52,6	20	1966–2013
Хоседа-Хард	67,1	59,4	84	1936–2013
Андерма	69,8	61,7	53	1966–2013
Малые Кармакулы	72,4	52,7	18	1966–2013
Марресале	69,7	66,8	24	1966–2013
Новый Порт	67,7	72,9	11	1966–2013
Антипаюта	69,1	76,9	2	1966–2013
Диксон	73,5	80,2	42	1966–2013
ГМО имени Е.К.Федорова	77,7	104,3	13	1966–2013
Болванский нос	70,5	59,1	13	1966–2013
Хатанга	72,0	102,3	30	1966–2013

Анализ экстремальных значений логично проводить отдельно для холодного и теплого сезонов, которые в Арктике характеризуются не только резко

контрастирующими температурами, но и особенностями циркуляции атмосферы. При этом следует принять во внимание, что собственно летними месяцами здесь являются, фактически, июль и август, а зимний сезон покрывает не только декабрь, январь и февраль, но обычно включает также ноябрь, март и апрель.

Для изучения возможностей воспроизведения экстремальных скоростей ветра атмосферными моделями, был использован архив модели INM-CM4.0 ($1,5 \times 2^\circ$ широты и долготы, для периода времени 1966–2005 гг.) и результаты моделирования отдельных событий в рамках COSMO-CLM (the Consortium for Small-scale Modelling) (www.cosmo-model.org) с пространственным разрешением $2,8 \times 2,8$ км². Данные по модели INM-CM4.0 (Володин и др., 2013)) получены 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 большие скорости ветра.

Используем для аппроксимации функции распределения повторяемости закон Вейбулла, имеющий в интегральном случае следующий вид:

$$\frac{n}{N} \approx F(U) = 1 - e^{-AU^k} \quad (1)$$

где: U — модуль скорости ветра;

$\frac{n}{N}$ — характеризует накопленную повторяемость.

Это выражение можно преобразовать так

$$\ln \left[-\ln \frac{N-n}{N} \right] = k \ln U + \ln A \quad (2)$$

Отсюда следует, что в специальных координатах $\ln \left[-\ln \frac{N-n}{N} \right]$ и $\ln U$ распределение вероятностей Вейбулла представляется прямой линией. Степень отклонения от нее эмпирических точек характеризует, вместе с известными статистическими критериями, применимость теоретического закона распределения.

Результаты

Рассмотрим пример эмпирического распределения повторяемости экстремумов скорости ветра (рис. 1). Хорошо видно, что набор эмпирических повторяемостей хорошо аппроксимируется прямой линией, однако заметно, что такая аппроксимация не будет удовлетворительно описывать самые большие значения скорости ветра и, в следствие этого их вероятность будет занижена. В этом случае для аппроксимации можно применить иную, отличную (от 1) трехпараметрическую зависимость, но в этом случае будет потеряно важное преимущество — новая функция не будет иметь того глубокого теоретиче-

ского смысла, который присущ закону Вейбулла как представителю семейства обобщенного закона распределения экстремальных величин (см. выше).

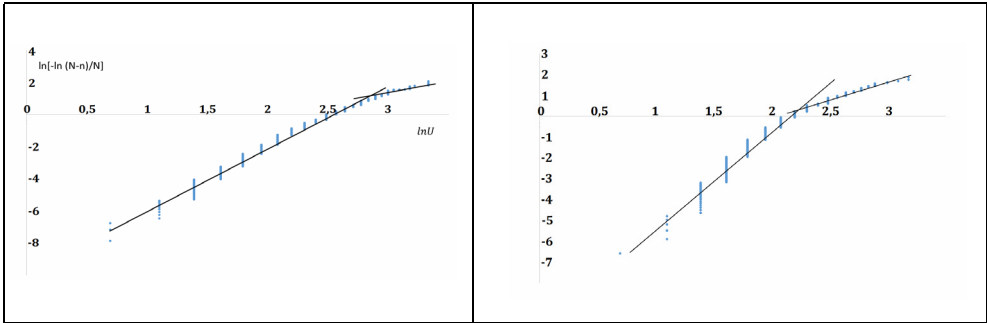


Рисунок 1а

Рисунок 1б

Рисунок 1 (а, б) — Эмпирические распределения выборки абсолютных максимумов за трехсуточные интервалы средней 10-минутной скорости ветра в холодные периоды года (1936 – 2013 гг.) по данным измерений на станции Марресале (а), и в теплые периоды года (1936 – 2013 гг.) по данным измерений на станции Зимнегорский Маяк (б), спрямленные на сетке вейбулловского распределения вероятностей $(\ln[-\ln \frac{N-n}{N}], \ln U)$. Отрезки прямых соответствуют двум различным законам распределения.

Вид кривой (рис.1) подсказывает возможность иной интерпретации. Можно предположить, что нарушен один из базовых принципов, лежащих в основе теории экстремальных случайных процессов (см. выше), а именно требование, чтобы все выборочные данные принадлежали к одному семейству. Если же считать, что в выборку замешаны, например, представители двух различных распределений, но каждое из них (поскольку это случай экстремальных значений) может быть аппроксимировано функции Вейбулла, то может быть осуществлен подбор двух независимых друг от друга спрямляющих линий. Эта ситуация и показана в качестве примера на рис.1 для двух станций и разных сезонов. Видно, что каждая группа точек, со значениями больше ($U > U_{th}$) и меньше ($U < U_{th}$) хорошо спрямляется в избранной специальной системе координат, характеризуя то, что набор экстремумов сформирован из величин, относящихся к различным генеральным совокупностям.

Отметим, что выборка значений ($U > U_{th}$) должна описываться распределением Парето (Brabson and Palutikof, 2000):

$$\Phi(U) = 1 - \left(\frac{U_{th}}{U}\right)^{\Upsilon} \quad (3)$$

Причем пороговое значение не назначается априорно (что типично при применении закона Парето), а определяется путем анализа применимости закона Вейбулла. Например, для станции Териберка ряды экстремумов очень хорошо описываются распределением Парето с уровнем отсечения, взятым из анализа вейбулловской функции $U_{th} = 21$ м/с, а расчет второго параметра дает $\Upsilon = 6,3$. Если построить кривую (3) с этими параметрами и сравнить ее с кри-

вой Вейбулла при $A = 0,012$ и $k = 1,77$ (см. табл. 2), то можно убедиться, что, начиная приблизительно с 35 м/с, вероятности по этим законам мало отличаются между собой (и мало отличаются от единицы).

Эта ситуация, когда среди одинаковых (по номенклатуре) величин встречаются принципиально разные представители, обнаруживается не впервые — данный эффект отмечался при изучении распределения повторяемости численности населения городов разных размеров, в распределении флуктуаций скорости в турбулентных течениях, в распределении площадей природных пожаров, в распределении богатств и доходов, и др., и породил для их описания своеобразную терминологию. Так, основной массив «промежуточных» экстремумов назван белыми лебедями, и появление в *этой выборке* самых больших и редких явлений названо черными лебедями (Taleb, 2010). Следует подчеркнуть важную мысль — объекты, принадлежащие одному закону распределения, имеют сходный генезис (Голицын, 2013), т.е. крупные аномалии отличаются от своих «меньших родственников» только амплитудой или степенью воздействия. События, которые относятся к другому закону распределения, имеют иной генезис, они характеризуют принципиально другие объекты, названные 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 обычных людей по богатству и общественному положению.

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

На рис. 2 показаны примеры эмпирических распределений экстремумов скорости ветра, спрямленных на сетке вейбулловского распределения, демонстрирующие присутствие в каждом случае «лебедей» («черных лебедей» — обозначим их аббревиатурой «ЧЛ» — при переходе к редким большим аномалиям) и «драконов» (обозначим их аббревиатурой «Д»). Видно, что в обоих диапазонах прямая линия служит прекрасной аппроксимацией эмпирического распределения. Это подтверждает очень большой коэффициент детерминации и выполненные (на основе критерия Колмогорова) оценки соответствия эмпирического распределения повторяемости теоретической функции распределения вероятностей. Отметим интересную вещь: объявленные нереальными (см. выше) сверхбольшие скорости ветра располагаются на продолжении прямой закона Вейбулла «Д».

Обработка данных всех станций (см. табл. 1) показала аналогичные результаты. Этот результат убедительно демонстрирует успешность применения высказанной выше интерпретации, согласно которой экстремумы скорости ветра состоят из смеси значений, относящихся к разным генеральным совокупностям. В табл. 2 представлены параметры распределения Вейбулла.

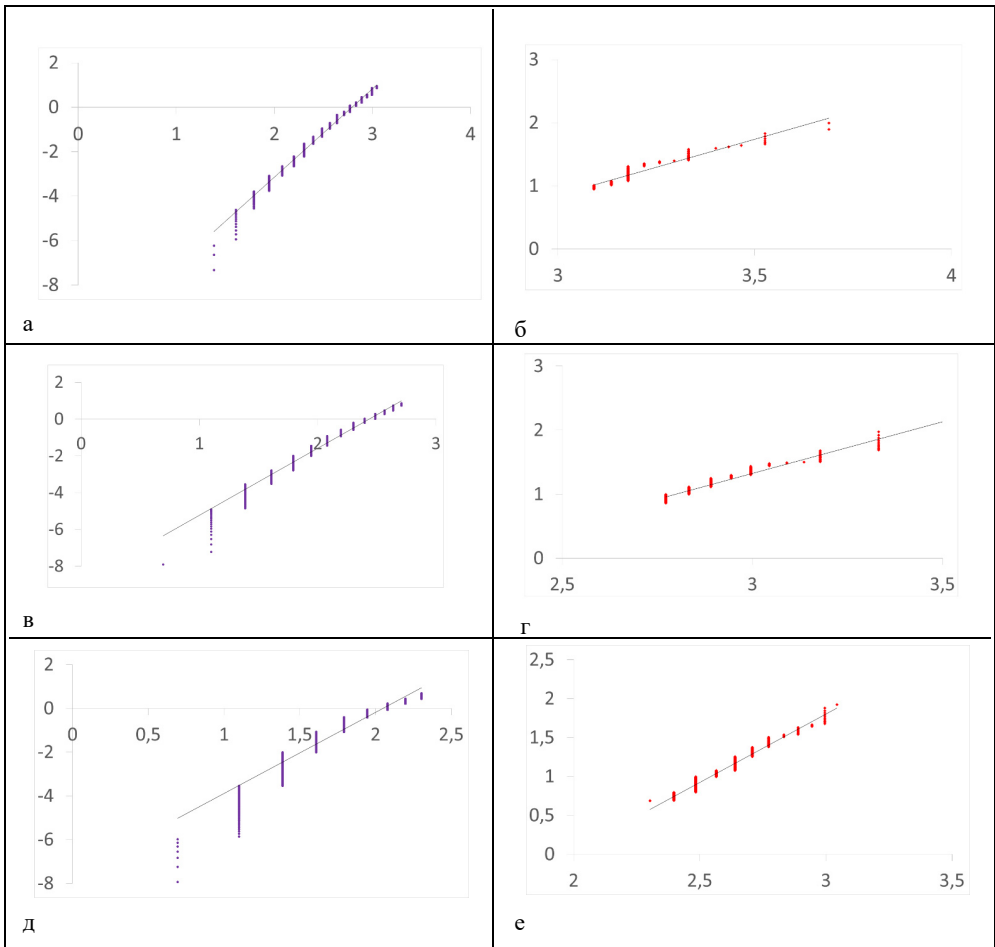


Рисунок 2 — Эмпирические распределения выборки абсолютных максимумов за трехсуточные интервалы средней 10-минутной скорости ветра в холодные периоды года (1936 – 2013 гг.) по данным измерений на станциях Териберка (а — «ЧЛ» $R^2 = 0,99$, б — «Д» $R^2 = 0,92$), Новый Порт (в — «ЧЛ» $R^2 = 0,97$, г — «Д» $R^2 = 0,96$) и Хатанга (д — «ЧЛ» $R^2 = 0,91$, е — «Д» $R^2 = 0,97$), спрямленные на сетке вейбулловского распределения вероятностей

$$\left(\ln \left[-\ln \frac{N-n}{N} \right], \ln U \right). (R^2 — Коэффициенты детерминации).$$

Таблица 2 — Параметры распределения Вейбулла, рассчитанные за период 1966-2013 гг., отдельно для двух групп экстремумов, отвечающих «ЧЛ» и «Д» (для значений скоростей в м/с)

Станция	Принадлежность к семейству	Холодный сезон		Теплый сезон	
		к	А	к	А
Териберка	«ЧЛ»	3,97	1,6E-05	4,39	3,1E-05
	«Д»	1,77	0,0120	2,12	0,0081
Мурманск	«ЧЛ»	3,95	0,0001	4,94	3,6E-05
	«Д»	1,34	0,1039	2,56	0,0062
Ловозеро	«ЧЛ»	3,19	0,0013	4,45	0,0003
	«Д»	1,69	0,0429	2,30	0,0202

Станция	Принадлежность к семейству	Холодный сезон		Теплый сезон	
		к	А	к	А
Краснощелье	«ЧЛ»	3,14	0,0043	3,04	0,0012
	«Д»	0,99	0,4608	1,45	0,0664
Кандалакша	«ЧЛ»	3,50	0,0017	4,20	0,0006
	«Д»	1,22	0,2322	1,45	0,1545
Умба	«ЧЛ»	3,63	0,0006	4,56	0,0002
	«Д»	1,70	0,0508	0,9285	0,4050
Архангельск	«ЧЛ»	3,60	0,0016	4,00	0,0010
	«Д»	1,48	0,1159	1,49	0,1372
Зимнегорский Маяк	«ЧЛ»	3,50	0,000145	3,80	0,0002
	«Д»	1,13	0,1125	1,40	0,0759
Канин Нос	«ЧЛ»	4,80	0,2E-05	4,40	1,9E-05
	«Д»	2,40	0,0017	1,30	0,0835
Колгуев Северный	«ЧЛ»	4,50	0,7E-05	6,10	0,1E-05
	«Д»	1,50	0,0309	2,90	0,0013
Коткино	«ЧЛ»	2,90	0,0032	3,56	0,0013
	«Д»	0,40	1,6109	1,66	0,0869
Нарьян-Мар	«ЧЛ»	3,12	0,0017	4,45	0,0002
	«Д»	1,54	0,0620	1,88	0,0389
Усть-Уса	«ЧЛ»	3,70	0,0006	5,20	3,0E-05
	«Д»	1,25	0,1515	1,72	0,0620
Усть-Цильма	«ЧЛ»	4,20	0,0002	5,10	4,9E-05
	«Д»	0,90	0,3854	1,85	0,0561
Окунев Нос	«ЧЛ»	3,40	0,0014	4,40	0,0002
	«Д»	0,52	1,1722	0,98	0,3816
Хоседа Хард	«ЧЛ»	3,00	0,0011	4,50	8,8E-05
	«Д»	0,98	0,2695	2,20	0,0159
Малые Кармакулы	«ЧЛ»	3,40	5,4E-05	4,08	3,6E-05
	«Д»	1,90	0,0042	1,86	0,0087
Андерма	«ЧЛ»	3,60	7,7E-05	4,26	6,7E-05
	«Д»	1,85	0,0127	2,20	0,0108
Марресале	«ЧЛ»	3,60	0,0001	4,80	1,8E-05
	«Д»	1,67	0,0264	1,86	0,0237
Новый Порт	«ЧЛ»	3,65	0,0002	5,00	1,2E-05
	«Д»	1,60	0,0303	1,80	0,0254
Антипаюта	«ЧЛ»	3,19	0,0006	4,60	4,4E-05
	«Д»	2,14	0,0093	1,88	0,0266
Диксон	«ЧЛ»	3,23	0,0002	5,14	0,5E-05
	«Д»	2,00	0,0088	2,70	0,0023
Болванский нос	«ЧЛ»	3,70	6,5E-05	4,15	5,9E-05
	«Д»	1,65	0,0254	2,1	0,0115
Хатанга	«ЧЛ»	3,70	0,0005	5,20	2,1E-05
	«Д»	1,76	0,0319	1,50	0,0756

Примечание. Коэффициенты детерминации, характеризующие качество спрямления эмпирических данных на сетке вейбулловского распределения, никогда не опускались ниже 0,90 (см. рис.1).

Для характеристики географии экстремумов и сопоставления летних и зимних условий, удобно использовать квантильные значения скорости. Надежно вычисленные в каждом случае параметры распределения позволяют провести такой расчёт, преобразовав формулу (1) к следующему виду:

$$U(p) = \left(\frac{1}{A} \ln \frac{1}{1-p} \right)^{1/k} \quad (4)$$

где: p — пороговое значение вероятности;

$U(p)$ — есть соответствующее квантильное значение скорости ветра.

Значение p можно выразить через «время возврата», характеризующее интервал времени, через который вновь появляются такие же (или большие) аномалии скорости: $T = 1/(1-p)$. Примем для анализа экстремумов $p = 0,99$. Для летнего периода (62 дня — июль и август) общий объем выборки за 47 лет (1966–2013 гг.), при условии просеивания через 3 суток составляет 971 суток. Доля событий ($1 - 0,99 = 0,01$) равна приблизительно 10 суткам. За 47 лет это соответствует ситуации появления экстремума $U(0,99)$ один раз за 5 теплых сезонов. Для холодного сезона $p = 0,99$ отвечает среднему времени появления экстремума $U(0,99)$ два раза за три холодных периода года. Вычисленные по данным всех станций значения (раздельно для «ЧЛ» и «Д») представлены в табл. 3.

Таблица 3 — Квантильные значения модуля скорости ветра, м/с, $U(0,99)$ (1966–2013 гг.), рассчитанные отдельно для двух групп экстремумов, отвечающих «ЧЛ» и «Д»

Станция	«Ч»	«Д»	Отношение «ЧЛ» / «Д»	«ЧЛ»	«Д»	Отношение «ЧЛ» / «Д»
	холодный сезон			теплый сезон		
Териберка	24	29	0,83	15	20	0,75
Мурманск	15	17	0,88	11	13	0,85
Ловозеро	13	16	0,81	9	11	0,89
Краснощелье	9	10	0,90	8	11	0,82
Кандалакша	10	12	0,83	9	10	0,90
Умба	12	14	0,86	10	11	0,91
Архангельск	9	12	0,75	8	11	0,73
Зимнегорский Маяк	19	27	0,70	14	19	0,74
Канин Нос	21	27	0,78	17	22	0,77
Колгуев Северный	19	28	0,68	12	17	0,71
Коткино	12	14	0,86	8	11	0,73
Нарьян-Мар	13	16	0,81	10	13	0,77
Усть-Уса	11	15	0,73	10	12	0,83
Усть-Цильма	11	16	0,69	11	16	0,69
Окунев Нос	11	14	0,79	10	13	0,77
Хоседа Хард	16	18	0,89	11	13	0,85
Малые Кармакулы	28	40	0,70	18	29	0,62
Андерма	21	24	0,88	13	18	0,72
Марресале	19	22	0,86	13	17	0,77

Новый Порт	17	23	0,74	13	18	0,72
Антипаюта	16	18	0,89	12	16	0,75
Диксон	21	23	0,91	14	17	0,82
ГМО имени Е.К.Федорова (мыс Челюскин)	18	23	0,78	12	17	0,71
Болванский Нос	20	23	0,87	15	17	0,88
Хатанга	12	17	0,71	11	16	0,69

Как видно из табл. 3, одни и те же квантильные значения существенно больше (на 10–30%) в распределении «драконов», чем у «черных лебедей». «Чемпионом» является станция Малые Кармакулы, где $U(0,99) = 40$ м/с. Данное значение даже, в некотором смысле «выбивается» из данных других станций. Однако это, по-видимому, реальная ситуация: огромные скорости ветра здесь, на западном побережье Новой Земли, связаны с явлением боры, во время которой происходит обвал холодного воздуха Карского моря с Новоземельских гор на побережье незамерзающего Баренцева моря.

Экстремумы скорости в целом выше в холодный период года, чем летом. Особенно четко это заметно для региона незамерзающего Баренцева моря (станции Териберка, Зимнегорский Маяк, Малые Кармакулы), где зимой усиливается циклогенез. Восточнее, там, где зимой моря, покрытые льдом, становятся неотличимы по термическим свойствам от суши, данный механизм не работает и экстремальные скорости ветра, фиксируемые зимой береговыми станциями (Андерма, Марресале, ГМО имени Е.К. Федорова, Диксон) значительно меньше ($U(0,99) = 22 - 23$ м/с) (см. Табл.3).

Другая, четко наблюдаемая закономерность, — это то, что экстремальные значения существенно больше на береговых станциях, чем во внутриматериковых регионах. Это происходит не только за счет того, что шероховатость меньше над водой, чем над сушей. Важную роль играет то, что шторма интенсивнее над морскими акваториями.

Дискуссия

Рассмотрим, как воспроизводятся экстремумы скорости ветра по результатам моделирования в рамках глобальной климатической модели. Анализу были подвергнуты сеточные данные, приблизительно соответствующие расположению метеорологических станций, причем в случае станций, расположенных на побережье, выбирался счетный узел, расположенный преимущественно на морской акватории. Этим достигался учет того, что, как уже было отмечено, над морями скорости ветра типично больше.

Экстремальные скорости ветра по данным модели INM-CM4 (как у земной поверхности, так и в нижней тропосфере) распределены по закону Вейбулла (рис. 3): это подтверждает очень большой коэффициент детерминации и выполненные оценки соответствия эмпирического распределения повторяемости теоретической функции распределения вероятностей, выполненные на основе критерия Колмогорова.

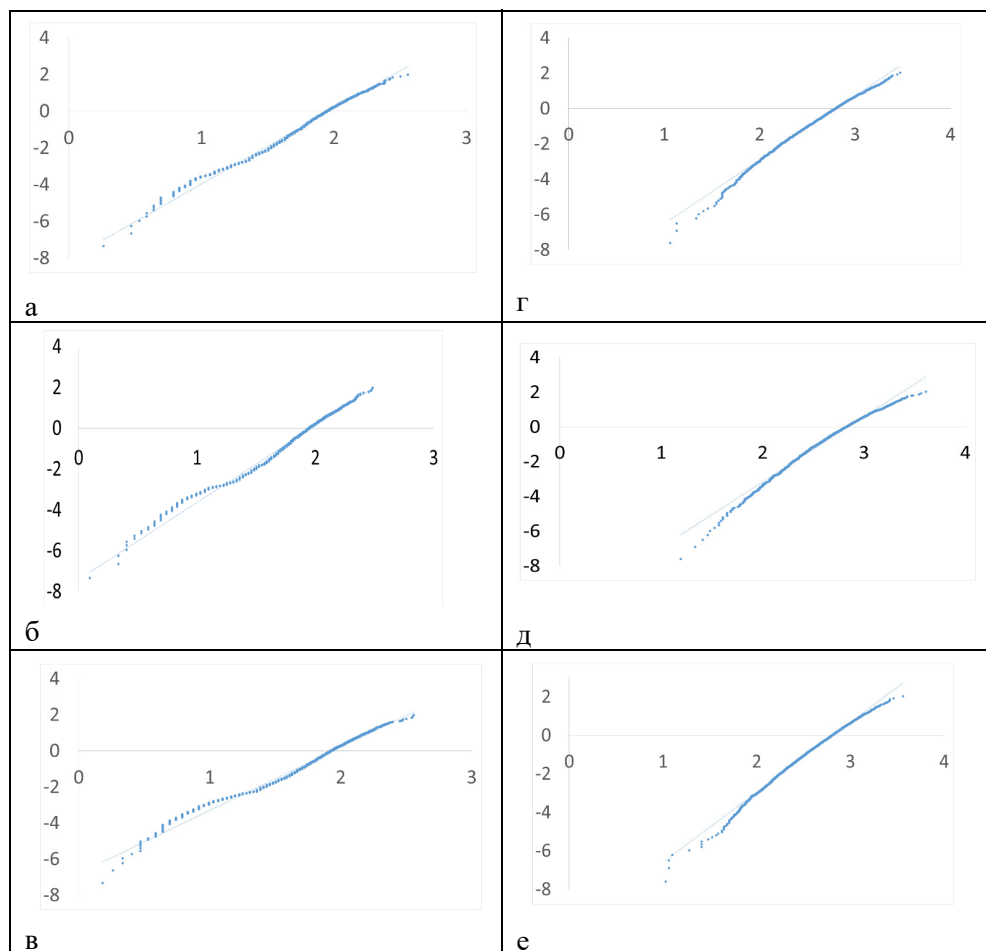


Рисунок 3 — Интегральные функции распределения (спрямленные на сетке распределения Вейбулла) абсолютных максимумов скорости ветра за трехсуточные интервалы для холодного сезона по данным моделирования INM-CM4.0 для узлов модельной сетки наиболее близких к станциям Зимнегорский маяк (а, г), Краснощелье (б, д) и Кандалакша (в, е); (а, б, в — данные с уровня 10 м; г, д, е — уровня 850 гПа). Коэффициент детерминации во всех случаях равен 0,99.

Рассмотрим данные у подстилающей поверхности. На рис. 3 (а, б, в) не наблюдается характерного изгиба эмпирических данных, послужившего поводом раздельного рассмотрения «ЧЛ» и «Д» (см. рис. 1). Фактически речь идет только о «ЧЛ», причем, квантильные значения (табл. 4), практически одинаковы у этих различно расположенных станций, в то время как по данным наблюдений отмечены важные особенности, отражающие различия в географическом положении (табл.3). Для станции Краснощелье, расположенной в центральной части Кольского полуострова, и станции Кандалакша, также, находящейся, фактически, вдали от открытого моря, совпадение модельных значений $U(0,99)$ с фактическими очень хорошее. В то же время для станции Зимнегорского маяка различия составляют около 50%. Возможно, что это связано с недостаточно адекватным распределе-

нием в модели моря и суши, не позволившим правильно воспроизвести экстремальные значения.

Таблица 4 — Квантильные значения модуля скорости ветра $U(0,99)$, м/с, рассчитанные для зимнего сезона в некоторых узлах сетки модели INM-CM4 на уровне 10 м и на поверхности 850 гПа

Наиболее близкая станция	INM-CM4. вертикальная координата	$U(0,99)$ м/с
Зимнегорский Маяк	10 м	10,3
	850 гПа	25,2
Краснощелье	10 м	10,8
	850 гПа	25,4
Кандалакша	10 м	10,7
	850 гПа	25,6

Отмеченные проблемы в использовании модельных данных диктуют необходимость поиска иных подходов к исследованию статистики больших скоростей ветра у поверхности. Поскольку их генезис связан с распространением вниз, к земной поверхности, течений верхней части пограничного слоя, то считается возможным использовать для оценки статистики ветрового режима приповерхностных слоев воздуха данные о режиме ветра в свободной атмосфере (как оценка сверху). Тем более, это относится к модельным данным, когда вместо значений ветра у поверхности (традиционно трудно воспроизводимых из-за проблем с моделированием пограничного слоя), используется гораздо лучше воспроизводимый ветровой режим нижней тропосферы (Yin and Branstator, 2007). Такой подход был реализован и в данном исследовании.

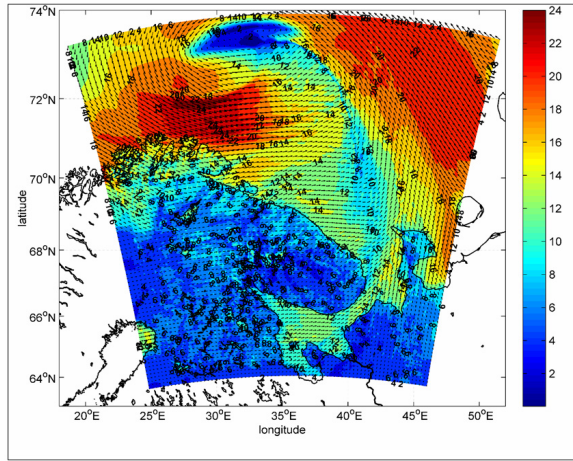
Распределение экстремумов скорости ветра на 850 гПа демонстрирует прекрасное соответствие закону Вейбулла (см. примеры на рис. 3 г, д, е). В то же время можно опять, как и в предыдущем случае анализа приземного ветрового режима, констатировать, что практически всю совокупность данных можно выразить одним распределением. На рис. 3д, правда, можно увидеть некоторое характерное изгибание эмпирических точек вниз от аппроксимационной линии, однако этих данных так мало, что трудно уверенно говорить, что они принципиально отличаются от своих меньших собратьев. Таким образом, модель воспроизводит «ЧЛ», а «Д» в результатах моделирования не обнаруживаются. Полученные для разных узлов $U(0,99)$ получились практически одинаковыми (~ 25 м/с), причем, такие значения характерны и для других модельных узлов Кольского полуострова. Это существенно больше, чем аналогичная величина, полученная у земной поверхности по данным измерений на станциях Кандалакша и Краснощелье, а на станции Зимнегорский Маяк она близка к квантильному значению $U(0,99)$, но принадлежащему к семейству «Д».

Таким образом, получается, что климатическая модель не воспроизводит важную компоненту атмосферной циркуляции, приводящую к появлению особенно больших скоростей ветра. Использование для восполнения этого дефицита данных моделирования свободной атмосферы также не решает проблему, поскольку воспроизводимые максимальные скорости ветра, хоть и оказываются близки к данным наблюдений, отличаются иным законом распределения вероятностей, и это означает, что их генезис иной.

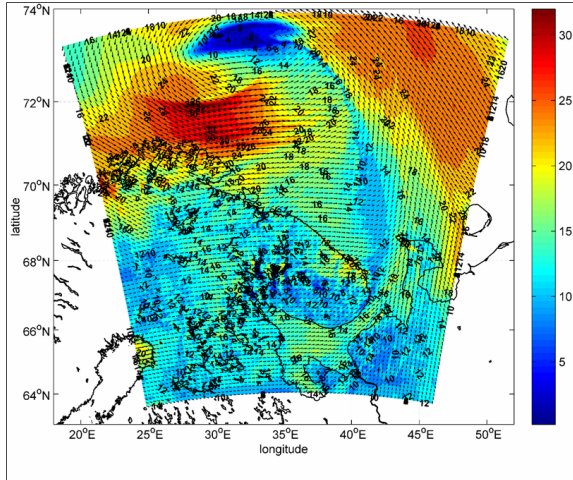
Опыт эмпирических исследований указывает на то, что экстремальные скорости ветра связаны с мезомасштабными системами циркуляции. В некоторых случаях эта связь четко установлена (в случае, так называемых, «падающих циркуляций», примером которых является упомянутая выше в данном контексте бора), в иных ситуациях (например, в конвективных системах, при образовании торнадо) теория развита недостаточно полно. Для компьютерного воспроизведения такого рода циркуляций служат мезомасштабные модели, которые при практической реализации разворачивают на ограниченной территории из-за очень большого объема вычислительной работы. Поэтому мы обратились к данным регионального моделирования для того, чтобы оценить, способна ли высокодетализированная по пространству модель воссоздать экстремально большие скорости ветра. В данном случае речь не идет об исследовании статистических свойств: проверяется сама возможность появления в модельных данных скоростей, близких к наблюдающимся на станциях.

11 декабря 2013 г. станцией Териберка на высоте 10 м зафиксированы средние скорости ветра (не порывы!), превышающие 30 м/с. Данное событие, с точки зрения его места в статистической выборке, представляло собой событие «Д». В этот день погоду определял циклон, центр которого находился над акваторией Баренцева моря южнее Шпицбергена.

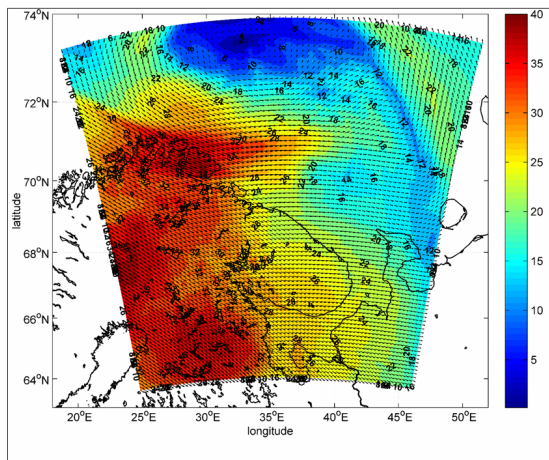
Для воспроизведения этой ситуации была использована модель COSMO-CLM. Данный модуль предназначен для решения климатических задач, однако развивается на единой платформе COSMO. Это негидростатическая атмосферная модель, основанная на системе термогидродинамических уравнений, описывающих сжимаемый поток влажного воздуха. Уравнения модели записаны в сферической системе координат со смещенным полюсом по горизонтали и орографической вертикальной координатой. В качестве начальных и граничных условий использованы данные реанализа ERA Interim. Компьютерный эксперимент представлял собой решение задачи Коши: по начальным данным воспроизводилась требуемая атмосферная циркуляция с заданной заблаговременностью (в данном случае это 6 часов). Для моделирования применен шаг сетки по пространству 2,8 км, что дает возможность достаточно полно воспроизводить как синоптические, так и мезомасштабные циркуляции.



а



б



в

Рисунок 4 — Прогнозированное (с заблаговременностью 6 часов) распределение модуля и направления скорости ветра 11.12.2013 г., в 18.00 GMT, по результатам моделирования COSMO-CLM в приземном слое 10 м (а), на уровне ~ 100 м (б) и ~3000 м (в). (Цветовая легенда на каждом рисунке различна).

На рис. 4 представлены результаты моделирования поля скорости у поверхности (на высоте 10 м) и на некоторых высотах для одного срока. Видно, что большие скорости ветра воспроизведены на южной и восточной перифериях циклона. В первой из названных зон обращает на себя внимание то, что ветер усиливается при приближении к берегу (рис. 4а, б) — возможно, что это проявление усиления ветра за счет того, что крупномасштабный поток прижимается к барьеру, который образуют горы (1–2 км высотой) северной части Скандинавского полуострова. Однако, как видно из рис. 4в, в свободной атмосфере выше гор скорости ветра были еще больше, так что эффект вдольберегового усиления не был определяющим. В южных потоках восточной периферии циклона скорость ветра с высотой также увеличивается. Можно поэтому считать, что (как высказывалось ранее) происхождение больших скоростей ветра у поверхности связано именно с проникновением сюда «горячих частиц» воздуха из верхней части пограничного слоя. Обращает на себя внимание то, что экстремумы сконцентрированы в узких зонах или «пятнах», охватывающих несколько счетных узлов т.е. это возмущения мезомасштаба.

Данные моделирования не продемонстрировали экстремальных скоростей именно в Териберке — зона максимальных скоростей смещена к полуострову Варангер и далее на запад. Однако важным обстоятельством является то, что модель COSMO-CLM оказалась способна воссоздавать над морем и вблизи побережий скорости ветра, приближающиеся к наблюдаемым экстремальным значениям. Аналогичный вывод сделан при анализе других ситуаций (28 октября 2000 г., когда максимальные ветры наблюдались в районе пролива Карские Ворота, и др.). Поэтому можно предположить, что действительно, плохое воспроизведение «драконов» в относительно грубых моделях связано именно с недостаточным разрешением циркуляционных систем мезомасштаба.

Заключение

Изучение экстремумов скорости ветра по данным стандартных наблюдений в прибрежных регионах Арктики показало, что они складываются из двух наборов данных, имеющих различные статистические свойства, но каждый из которых подчиняется закону Вейбулла. В соответствии с начинающейся складываться терминологией, они были обозначены, как ЧЛ и Д. Именно последние обозначают самые большие аномалии.

В модели общей циркуляции атмосферы и в данных реанализа обнаружены только ЧЛ. Поскольку функция распределения является индикатором общности физического механизма формирования рассматриваемых событий (или объектов), то можно считать, что не воспроизводится некоторый специальный эффект, ответственный за возникновение аномально больших скоростей ветра.

Ответственные за аномалии типа «драконов» значения скорости ветра обнаружены в результатах детализированного моделирования, выполненного на основе региональной мезометеорологической модели. Это указывает, что их происхождение связано с мезомасштабными явлениями. Более детально говорить о порождающих их циркуляционных механизмах преждевременно,

за исключением одной ситуации — новоземельской боры, в период развития которой экстремальные скорости, как известно, генетически связаны с гравитационными волнами.

Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ в рамках научного проекта № 14-37-00038.

Литература

- 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.
- Методы и средства статистической обработки и анализа информации об обстановке в Мировом океане на примере гидрометеорологии. 2009. Обнинск, ВНИИГМИ-МЦД, 416 с.
- Рожков В.А. 2001. Теория и методы статистического оценивания случайных величин и функций с гидрометеорологическими примерами. — СПб, Гидрометеиздат, 330 с.
- Brabson B.V., Palutikof J.P. 2000 Tests of the generalized Pareto distribution for predicting extreme wind speeds — Journal of Applied Meteorology, vol. 39, №9, pp. 1627–1640.
- Brasseur O. 2001. Development and application of a physical approach to estimating wind gusts — Monthly Weather Review, vol. 129, №1, pp. 5–25.
- Coles S.G., Walshaw D. 1994. Directional modelling of extreme wind speeds — Applied Statistics, pp. 139–157.
- Compo G.P., Whitaker J.S. and Sardeshmukh P.D. 2006. Feasibility of a 100-year reanalysis using only surface pressure data — Bulletin of the American Meteorological Society, vol. 87, №2, pp. 175–190.
- Compo G. P., Whitaker J. S., P. D. Sardeshmukh, Matsui N., Allan R. J., Yin X., Gleason B. E., Vose R. S., Rutledge G., Bessemoulin P., Brönnimann S., Brunet M., Crouthamel R. I., Grant A. N., Groisman P. Y., Jones P. D., Kruk M. C., Kruger A. C., Marshall G. J., Mauerer M., Mok H. Y., Nordli Ø., Ross T. F., Trigo R. M., Wang X. L., Woodruff S. D. and Worley S. J. 2011. The twentieth century reanalysis project. - Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, vol. 137, № 654, pp. 1–28. DOI: 10.1002/qj.776

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.

Fisher R. A., Tippett L. H. C. 1928. Limiting forms of the frequency distribution of the largest or smallest member of a sample. — *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, Cambridge University Press, vol. 24, №2, pp. 180–190.

Gnedenko B. 1943. Sur la distribution limite du terme maximum d'une serie aleatoire. — *Annals of mathematics*, pp. 423–453.

Gusella V. 1991. Estimation of extreme winds from short-term records. — *Journal of Structural Engineering*, 1991, vol. 117, №2, pp. 375–390.

Lindsay R., Wensnahan M., Schweiger A., Zhang J. 2014. Evaluation of Seven Different Atmospheric Reanalysis Products in the Arctic. — *Journal of Climate*, vol. 27, №7, pp. 2588–2606.

Palutikof J.P., Brabson B.B., Lister D.H. and Adcock S.T. 1999. A review of methods to calculate extreme wind speeds. — *Meteorological applications*, vol. 6, №2, pp. 119–132.

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

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, №4, pp. 485–498.

Yin J.H., G.W. Branstator. 2007. Extremes in global climate models. — *Extreme Events, Proceedings «Aha Huliko» a Hawaiian Winter Workshop, of Hawaii at Manoa, January 23–26, 2007*, pp. 67–72.