

УДК 551.50

Экстремумы скорости ветра Европейского сектора Арктики

Матвеева Т. А., Кислов А.В.

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

Информация об экстремально больших скоростях ветра важна в практических целях – при проектировании и эксплуатации мостов, на морской акватории и побережьях это еще и портовые сооружения, суда, буровые установки. Исследование особенностей аномалий ветрового режима западной части русской Арктики – наиболее динамично развивающегося заполярного региона России – особенно актуально в современных условиях, поскольку обнаружено, что частота экстремальных явлений возрастает [2]. Однако нет четкого представления о причине и характере этих изменений. Продвижение в данном направлении важно в контексте климатического прогноза. Поскольку он основан на использовании данных моделирования, то необходимо оценить потенциальную возможность воспроизведения экстремальных явлений атмосферными моделями. Этой проблеме, а также особенностям ветрового режима европейской части Арктики, посвящена настоящая работа.

Экстремальные скорости ветра у поверхности, в отсутствие особенных циркуляций (торнадо, бора и др.), формируются за счет транспортировки из свободной атмосферы частиц воздуха с большими скоростями. Это короткоживущие аномалии, связанные, однако, с синоптическими процессами.

Для изучения экстремумов в исследовании мы использовали статистический подход к описанию экстремальных явлений. Этот подход нацелен на выбор статистической модели для описания функции распределения. В первую очередь, её знание позволяет вычислять вероятность появления тех событий, которые в короткую выборку не были включены (т.е. возникает возможность формализованного прогнозирования экстремумов, если существует возможность прогноза параметров этих статистических моделей). Из статистической теории экстремумов известно, что экстремальные одинаково распределенные независимые случайные величины подчиняются обобщенному распределению вероятностей. Для аппроксимации распределения экстремумов скорости ветра успешно применяется один из его частных случаев – распределение Вейбулла [4].

Кроме того, в отчетах по исследованию изменения климата внимание обращается на то, что частота экстремальных явлений возрастает [2]. Однако нет четкого ответа на вопрос о том, связано ли учащение аномалий с глобальным изменением климата 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.

Данные

Для осуществления основной задачи исследования были использованы стандартные срочные станционные измерения скорости ветра на высоте 10 м на метеорологических станциях (meteo.ru) в регионе исследования (прибрежная зона Баренцева, Белого и Карского морей) (рис.1).

. Для оценки воспроизведения экстремальных скоростей ветра климатической моделью были использованы данные модели INM-CM4.0 (1,5x2° широты и долготы) , Historical experiment [1].



Рис. 1. Схема расположения метеорологических станций, данные которых были использованы в исследовании (всего 22 станции).

Статистическое исследование экстремумов

В основе статистической теории экстремумов лежит представление о том, что экстремальные одинаково распределенные независимые случайные величины подчиняются одному из трех распределений вероятностей (Гумбеля, Фреше и Вейбулла) [4], причем для аппроксимации распределения экстремумов скорости ветра успешно применяется одно из них – закон Вейбулла.

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. В данном исследовании был использован так называемый «метод независимых штормов», при котором для анализа отбирались экстремумы из групп данных, отстоящих на интервал времени, на протяжении которого исчезает связность вариаций. Кроме того, анализ экстремальных значений логично проводить отдельно для холодного и теплого сезонов, которые в Арктике характеризуются резко контрастирующими особенностями циркуляции атмосферы. При этом собственно к летнему сезону относятся июль и август, а зимний сезон покрывает не только декабрь, январь и февраль, но обычно включает также ноябрь, март и апрель.

Как уже было отмечено, хорошей аппроксимацией эмпирической функции распределения повторяемостей скоростей ветра служит закон Вейбулла. В интегральном виде он представлен следующим выражением:

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

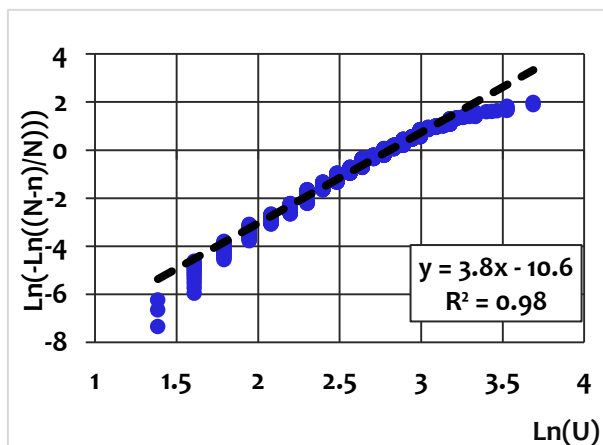
Здесь U – модуль скорости ветра, $\frac{n}{N}$ характеризует накопленную повторяемость.

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.

a)



б)

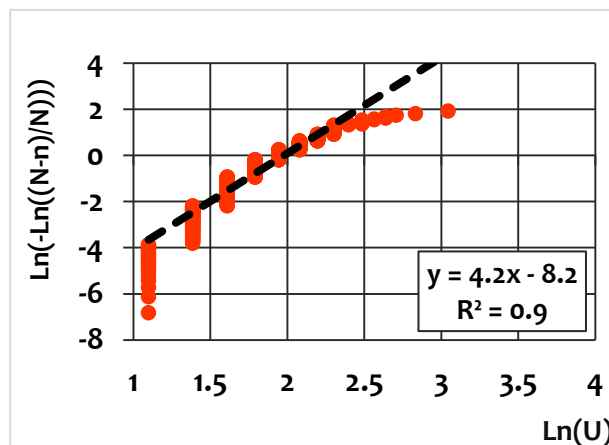
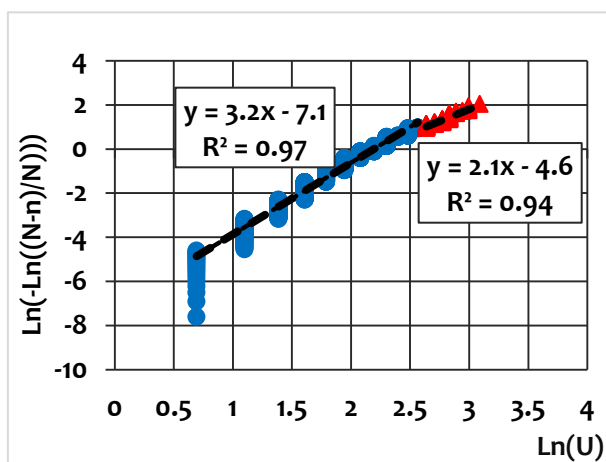


Рис. 2. Эмпирические распределения экстремумов скорости ветра (1966 – 2013 гг.) по данным измерений на станции Териберка (а) в холодные периоды и на станции Окунев нос (б) в теплые периоды года, спрямленные на сетке вейбулловского распределения вероятностей $(\ln[-\ln \frac{N-n}{N}], \ln U)$.

Хорошо видно, что у набора эмпирических точек имеется прямолинейный участок, однако при переходе к особенно большим значениям линия загибается вниз (рис. 2). Эта особенность оказалась типична для данных всех станций. В этом случае подбор общей линейной зависимости методом наименьших квадратов возможен и даже успешен в силу того, что большинство точек заполняет «линейный» участок. Однако такая аппроксимация не будет удовлетворительно описывать самые большие значения скорости ветра и вследствие этого их вероятность будет занижена.

a)



б)

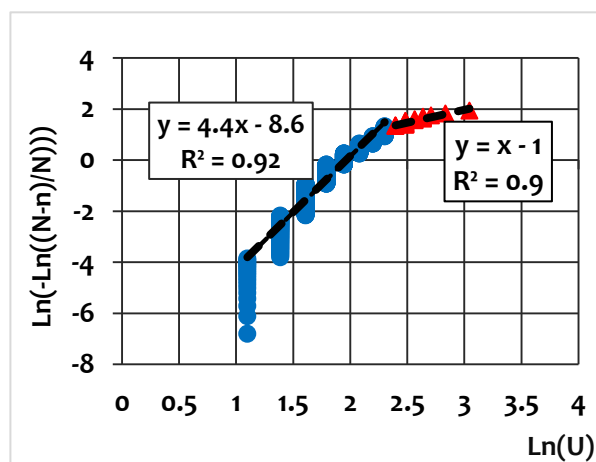


Рис. 3. Эмпирические распределения экстремумов скорости ветра года (1966 – 2013 гг.) по данным измерений на станциях Ловозеро (а) в холодные периоды и Окунев Нос (б) в теплые периоды, спрямленные на сетке вейбулловского распределения вероятностей $(\ln[-\ln \frac{N-n}{N}], \ln U)$. Отрезки прямых соответствуют двум различным законам распределения.

Вид кривой подсказывает возможность иной интерпретации. Можно предположить, что нарушен один из базовых принципов, лежащих в основе теории экстремальных случайных процессов, 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 может быть аппроксимировано функцией Вейбулла, то может быть осуществлен подбор двух независимых друг от друга спрямляющих линий.

На рис. 3 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.

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 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 [7]. Следует подчеркнуть важную мысль - объекты, принадлежащие одному закону распределения, имеют сходный генезис, 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 [6]. С помощью этих метафор удобно разделять события, принадлежащие разным законам Вейбулла.

На рис.3 приведены примеры эмпирических распределений экстремумов скорости ветра, спрямленных на сетке вейбулловского распределения, демонстрирующие присутствие в каждом случае «лебедей» («черных лебедей» при переходе к редким большим аномалиям) и «драконов». Видно, что в обоих диапазонах прямая линия служит хорошей аппроксимацией эмпирического распределения. Это подтверждает большой коэффициент детерминации и выполненные (на основе критериев Колмогорова и χ^2) оценки соответствия эмпирического распределения повторяемости теоретической функции распределения вероятностей. Обработка рядов наблюдений всех исследуемых станций 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.

Интересно также исследовать географию экстремумов и провести сопоставление летних и зимних условий, для этого удобно использовать квантильные значения скорости. Надежно вычисленные в каждом случае параметры распределения A и k Вейбулла позволяют провести такой расчёт, преобразовав формулу (1) к следующему виду:

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

Здесь p – пороговое значение вероятности, а $U(p)$ - соответствующее квантильное значение скорости ветра.

В табл. представлены Квантильные значения модуля скорости ветра, м/с $U(0,99)$ (1966 – 2013 гг.) на некоторых станциях (Териберка, Зимнегорский Маяк и Малые Кармакулы – прибрежные станции, Мурманск и Ловозеро – относительно континентальные).

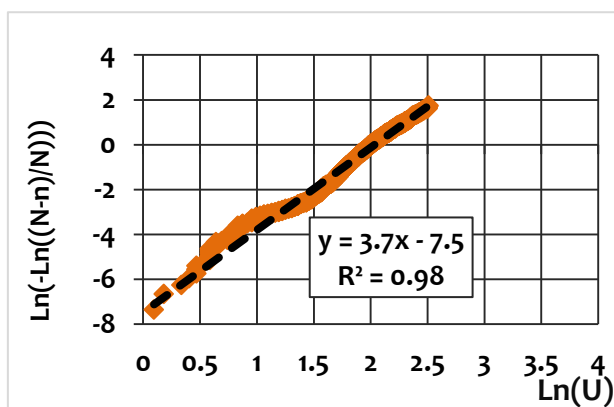
Станция	Холодный сезон		Теплый сезон	
	«Черные лебеди»	«Драконы»	«Черные лебеди»	«Драконы»
Териберка	24	29	15	20
Зимнегорский Маяк	19	27	14	19
Ловозеро	13	16	9	11
Мурманск	15	17	11	13
Малые Кармакулы	28	40	18	29

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. «Чемпионом» является станция Малые Кармакулы, где $U(0,99)=40$ м/с. 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 ветра по данным климатического моделирования

Аналізу были подвергнуты сеточные данные, приблизительно соответствующие расположению метеорологических станций. Экстремальные скорости ветра по данным модели INM-CM4 (как у земной поверхности, так и в нижней тропосфере) распределены по закону Вейбулла (рис.4): это подтверждает большой коэффициент детерминации и выполненные оценки соответствия эмпирического распределения повторяемости теоретической функции распределения вероятностей, выполненные на основе критериев Колмогорова и χ^2 . Не наблюдается характерного изгиба эмпирических данных, послужившего поводом отдельного рассмотрения «лебедей» и «драконов». Фактически речь может идти только о «лебедях», В модели и в данных реанализа обнаружены только «лебеди» и «черные лебеди». Поскольку функция распределения является индикатором общности физического механизма формирования рассматриваемых событий (или объектов)[3], то можно считать, что не воспроизводится некоторый специальный эффект, ответственный за возникновение аномально 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.

а)



б)

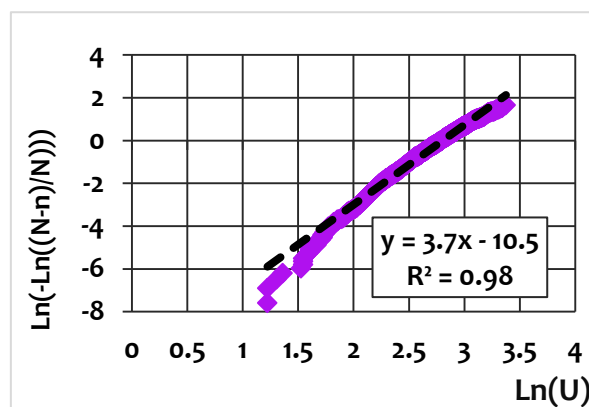


Рис. 4. Интегральные функции распределения повторяемости (спрямленные на сетке вейбулловского распределения) экстремальных скоростей ветра для холодного сезона по данным моделирования INM-СМ4.0 для узлов модельной сетки наиболее близких к станции Ловозеро: а - данные с уровня 10 м; б – изобарической поверхности 850 гПа.

Выводы

Изучение экстремумов скорости ветра по данным стандартных наблюдений в прибрежных регионах Арктики показало, что они представляют собой два набора данных, имеющих различные статистические свойства, но каждый из них подчиняется закону Вейбулла. В соответствии с начинающейся складываться метафорической терминологией [3], в настоящем исследовании они были обозначены как «лебеди» (самые крупные аномалии этого семейства – так называемые «черные лебеди») и «драконы». Именно последние обозначают самые большие аномалии. В климатической модели INM-СМ4.0 обнаружены только «лебеди» и «черные лебеди». Поскольку функция распределения является индикатором общности физического механизма формирования рассматриваемых событий, то можно считать, что не воспроизводится некоторый специальный эффект, ответственный за возникновение аномально больших скоростей ветра.

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

Литература

1. *Володин Е.М., Дианский Н.А., Гусев А.В.* Модель земной системы INMCM4: воспроизведение и прогноз климатических изменений в 19-21 веках. Известия РАН, физика атмосферы и океана, 2013, т. 49, №4, с. 379-400.
2. *Второй* оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме. М., 2014. 58 с.
3. *Голицын Г.С.* Статистика и динамика природных процессов и явлений. М., URSS, 2013. 398 с.

4. Fisher R. A., Tippett L. H. C. 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, 1928, vol. 24, № 02, pp. 180-190.
5. *Palutikof J. P. et al.* A review of methods to calculate extreme wind speeds // *Meteorological applications*, 1999, vol. 6, № 02, pp. 119-132.
6. Sornette D. Dragon-Kings, Black Swans and the prediction of crises // *International Journal of Terraspace Science and Engineering*, 2009, №2 (1), pp. 1-18.
7. *Taleb N. N.* The black swan: The impact of the highly improbable fragility. – Random House, 2010, vol. 2.