НЕСТАЦИОНАРНАЯ СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА СКОРОСТЕЙ ВЕТРА
РЕДКОЙ ПОВТОРЯЕМОСТИ В АЗОВО-ЧЕРНОМОРСКОМ РЕГИОНЕВ.П. Евстигнеев^{1,2}, В.А. Наумова^{1,2}, Н.А. Лемешко³¹ ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»,
РФ, г. Севастополь, ул. Университетская, 33² Институт природно-технических систем, РФ, г. Севастополь, ул. Ленина, 28³ Санкт-Петербургский государственный университет,

РФ, г. Санкт-Петербург, Университетская наб., 7

E-mail: vald_e@rambler.ru

В работе проведен анализ статистического распределения наибольших за год величин средней скорости ветра в Азово-Черноморском регионе по данным 33 метеорологических станций за период 1958–2013 гг. Получена статистическая оценка экстремумов скорости ветра путем аппроксимации обобщенной функции распределения экстремумов (GEV) к эмпирической выборке и ее экстраполяции в область малых обеспеченностей. В работе использованы две методологии и применены соответствующие им статистические функции распределения. Первая методология основана на предположении о стационарности параметров GEV-функции, вторая – на предположении зависимости параметра локализации экстремума μ от времени. Получено, что для 13 из 33 станций региона нестационарная GEV-функция адекватно описывает выборку наибольших скоростей ветра.

Ключевые слова: скорость ветра, функция распределения экстремальных величин, экстремум, нестационарность временного ряда, изменение климата.

Поступила в редакцию: 09.09.2021. После доработки: 20.09.2021.

Введение. Режиму ветра традиционно уделяется достаточно много внимания. В современной литературе существуют многочисленные публикации и справочные материалы о ветровом режиме Азово-Черноморского региона [1, 2]. Актуальность этого вопроса связывают с необходимостью углубленного изучения механизмов развития штормов в регионе [3], для чего требуется обобщение данных инструментальных наблюдений не только в прибрежной зоне, но и в открытой части моря. Вероятные экстремальные значения ветровых характеристик отражают наихудшие гидрометеорологические условия для проведения морских операций и судоходства, и обеспечения безопасности гидротехнических сооружений и береговой инфраструктуры, испытывающих наибольшую гидродинамическую и ветровую нагрузку при развитии шторма.

Важным практическим аспектом изучения ветрового режима является оценка ветрового потенциала для энергетики. Возрастающие потребности человечества в «экологически чистых» ис-

точниках энергии неизбежно приведут в ближайшем будущем к увеличению доли возобновляемой энергии в мировой энергетике. Особое место в перечне возобновляемых источников энергии занимает ее ветровая генерация. Оценка существующего потенциала ветровой энергии является современной и актуальной задачей, в том числе для побережья Черного и Азовского морей [4].

В различных справочных пособиях и монографиях по режиму Черного и Азовского морей помещены сведения о вероятных скоростях ветра малой обеспеченности как на побережье, так и в открытой части морей. Анализ существующих в литературе статистических оценок позволил сделать вывод о том, что расчет таких скоростей может существенно отличаться, если он выполняется для разных периодов лет. Например, согласно [5] один раз в 50 лет в открытых районах Черного моря может наблюдаться ветер со скоростью более 40 м/с. Согласно же [1] скорость в 40 м/с может наблюдаться в открытой части моря один раз в 100 лет. В атласе [6] и

вовсе над северо-западным, западным и северо-восточным районами раз в 50 лет указана скорость 24-26 м/с, а над центральным и юго-восточным районами – 23 м/с. Несоответствие в оценках вероятных скоростей разных авторов связано, очевидно, с использованием разных расчетных периодов для статистического оценивания. Отличие статистических оценок ветровых характеристик обусловлено нестационарностью временных рядов по ветру, проявляющейся в уменьшении скоростей ветра в Причерноморье и Приазовье за последние десятилетия [1, 7]. Вследствие присутствующей нестационарности, применение классических законов распределения (функции Вейбулла) к выборке скоростей ветра оказывается неадекватным, в особенности, в области малых обеспеченностей [2]. Таким образом, вопрос статистической оценки экстремальных характеристик ветрового режима для Азово-Черноморского региона не потерял своей актуальности в свете отмечаемых в последнее время климатических тенденций.

Целью настоящей работы стала статистическая оценка расчетных скоростей ветра малых обеспеченностей в Азово-Черноморском регионе с учетом влияния нестационарности временных рядов. Решение задачи в такой постановке применительно к исследуемому региону в научной литературе отсутствует.

Материалы. В работе использованы срочные данные 33-х пунктов наблюдений сети метеорологических станций России и Украины на побережье Азовского и Черного морей и территории Крыма. Статистическая выборка формировалась из данных о средней в срок скорости ветра, определяемой как средняя скорость за небольшой промежуток времени (10 мин – в случае наблюдений по анеморумбометру, 2 мин – по флюгеру).

Для получения надежных режимных оценок необходимо наличие качественных и однородных массивов гидрометеорологических данных. По этой причине предварительно была осуществлена проверка климатической однородности исторических массивов [8]. В ходе этой

процедуры ряды скоростей ветра были скорректированы с учетом высоты ветроизмерительного прибора, смены методики наблюдения за ветром, смены местоположения пунктов. Оценка вероятных скоростей ветра проводилась за расчетный период 1958-2013 гг. (56 лет). Выбор такого периода был продиктован необходимостью использовать, по возможности, качественные и одинаковые по объему массивы данных для разных пунктов наблюдений.

Методы статистического анализа, примененные в работе. На практике экстремальность значений метеорологического элемента определяется путем статистического оценивания величин редкой повторяемости 1 раз в определенное количество (10, 25, 50, 100) лет. Такая оценка невозможна без определения вида функции распределения экстремальных величин.

Существует несколько подходов к оценке статистических экстремумов. Первый основывается на использовании исходной режимной функции распределения величины, для построения которой используется большая выборка срочных данных наблюдений. Такой метод был использован нами ранее в [2]. С точки зрения статистики метод режимных функций чувствителен к качеству исходных данных, к полноте эмпирической выборки, виду теоретического закона особенно в области малых обеспеченностей. По этим причинам получили развитие другие методы, основанные на моделировании распределения величин в «хвостах» эмпирических распределений.

Так, в исследованиях широко применяется метод блочных максимумов [9]. Этот метод предполагает предварительную выборку максимальных значений параметра за отдельные продолжительные промежутки времени, например, максимальное за год значение. В нашей работе также был использован метод блочных максимумов. Как правило, в блочном методе используются годовые максимумы, распределение которых для больших выборок следует одному из трех асимптотических распределений – Гумбеля, Вейбулла или Фреше. В общем

случае вероятностная функция зависит от вида и параметров исходного распределения гидрометеорологической величины. Однако если вид этого распределения неизвестен, то рекомендуется использовать обобщенное распределение экстремальных значений (GEV):

$$F_{GEV}(x) = \Pr\{X \leq x\} = \exp\left[-\left(1 + \xi \cdot \frac{x - \mu}{\sigma}\right)^{-\frac{1}{\xi}}\right], \quad (1)$$

где ξ - параметр формы, σ - масштабирующий параметр, μ - параметр положения экстремума. Для оценки параметров распределения можно использовать метод максимального правдоподобия (МПП) [9]. Оценка параметров $\theta = (\mu, \xi, \sigma)$ в этом случае выполняется путем максимизации функции правдоподобия $L(\theta, y) = \prod_{i=1}^n f(y_i | \theta)$, где $f(y_i | \theta)$ - плотность вероятности GEV.

Как правило, расчеты ведутся в предположении постоянства вектора параметров θ GEV-модели распределения экстремумов. Однако нестационарность структуры временных рядов, используемых для построения статистической модели экстремумов, проявляется в том, что эти параметры могут быть функциями ковариантных переменных, в первом приближении линейными:

$$\begin{cases} \mu_t = \sum_{i=1}^k \beta_i U_i(t) \\ \log \sigma_t = \sum_{i=1}^k \delta_i V_i(t) \\ \xi_t = \sum_{i=1}^k \gamma_i W_i(t) \end{cases},$$

где $U = (U_1, U_2, \dots, U_k)$, $V = (V_1, V_2, \dots, V_k)$, $W = (W_1, W_2, \dots, W_k)$ - ковариантные переменные, которые, в свою очередь, могут быть функциями времени; $\beta_i, \delta_i, \gamma_i$ - гиперпараметры; $i = 1..k$, k - число ковариат. Логарифм σ введен для сохранения положительности значений масштабирующего параметра, играющего роль стандартного отклонения, т.е. строго положительно определенной величины.

В нестационарном случае функция правдоподобия представлена в виде:

$$L_n = \prod_{i=1}^n f_{GEV}(x_i | \mu_t, \sigma_t, \xi_t),$$

на основании которой можно оценить (гипер) параметры распределения. Ранее

было показано [10], что стандартный метод максимального правдоподобия неустойчив на малых выборках (наиболее частый случай на практике). Более устойчивым является метод, получивший название обобщенного метода максимального правдоподобия (ОМПП), также рекомендуемый в [10]. В нем устойчивость достигается путем априорной параметризации распределения параметра формы ξ бета-распределением $\pi_\xi(\xi) = \text{Beta}(u = 6, v = 9)$. Параметры бета-распределения определены эмпирически, исходя из анализа большого массива геофизических данных. Тогда оценка ОМПП будет являться решением следующей оптимизационной задачи:

$$\begin{cases} \max_{\theta} L_n(x; \theta) \\ \xi \sim \text{Beta}(u, v) \end{cases},$$

что фактически эквивалентно максимизации (поиска моды) апостериорного распределения параметров, определенного на выборке эмпирических данных как:

$$\pi(\theta | x) \propto L_n(x | \theta) \pi_\xi(\xi).$$

Поиск моды этого распределения и определение необходимых параметров может быть выполнено градиентным методом, например, методом Ньютона-Рафсона. Все вычисления в настоящей работе выполнены в специализированной программной среде R (www.r-project.org).

Результаты и обсуждение. Для построения статистической модели на основе функции обобщенного распределения GEV были подготовлены эмпирические выборки максимальных за год средних скоростей ветра по каждому из 33 пунктов наблюдений Азово-Черноморского региона. Объемы выборок варьировались в пределах 48-56 значений. Методом МПП была получена оценка вероятных скоростей ветра в предположении стационарной модели GEV. Метод блочных максимумов является довольно эффективным способом исследования вероятностной природы штормовых погодных условий в виде статистических функций распределения максимальных величин, которые позволяют вычислить вероятные скорости ветра редкой повторяемости. Результат

вычисления для Азово-Черноморского региона представлен в табл. 1.

Стационарная оценка экстремальных скоростей. Из табл. 1 следует, что для пунктов наблюдения в северо-западной части Черного моря вероятные значения скорости ветра V_{50} , полученных по стационарной модели, составляют от

18 до 40-41 м/с. Такое внимание к значениям средней скорости ветра повторяемостью 1 раз в 50 лет обусловлено тем, что она используется для расчета нормативных ветровых нагрузок на инженерно-технические объекты согласно действующему СП 20.13330.2016 (см. п.11.1.4).

Таблица 1. Вероятные скорости ветра, возможные 1 раз в n лет, для пунктов Азово-Черноморского побережья и территории Крыма за период 1958–2013 гг.

Пункт наблюдения	Скорость ветра (м/с) 1 раз в n лет (V_n)							
	Стационарная модель				Нестационарная модель			
	V_{10}	V_{25}	V_{50}	V_{100}	V_{10}	V_{25}	V_{50}	V_{100}
Северо-западный район Черноморского побережья								
Херсон	21,0	23,3	24,9	26,3	21,2	23,9	25,9	27,8
Ильичевск	21,2	22,8	23,9	25,0	21,1	22,4	23,2	24,0
Одесса, порт	20,8	22,4	23,5	24,6	20,7	22,3	23,4	24,4
Очаков	18,7	20,1	21,0	21,9	18,6	19,9	20,8	21,6
Хорлы*	22,8	26,9	30,6	34,8	20,9	25,7	30,2	35,7
Николаев. АМСГ	19,7	22,2	24,1	26,0	18,8	21,2	23,0	24,8
Черноморское*	24,6	28,6	31,9	35,7	24,1	29,2	33,9	39,5
Керчь-Туапсинский район Черного моря								
Анапа*	28,9	34,5	39,4	45,1	26,3	32,1	37,5	44,1
Новороссийск	35,0	37,9	39,7	41,2	35,3	38,7	41,0	43,0
Геленджик	31,7	35,7	38,3	40,7	32,3	36,4	39,1	41,5
Сочи	20,1	26,6	34,1	44,9	19,5	24,4	29,5	36,2
Керчь, АМСГ*	21,7	23,6	25,0	26,3	21,7	25,0	27,8	31,0
Опасное*	22,3	24,6	26,4	28,1	20,4	23,7	26,7	30,2
Феодосия	20,9	23,2	24,7	26,1	20,6	22,4	23,5	24,5
Азовское побережье								
Геническ	29,0	31,7	33,5	35,1	29,2	32,1	33,9	35,6
Мариупольская ГМО*	27,4	32,0	35,7	39,7	26,1	31,9	37,2	43,5
Таганрог*	20,8	23,4	25,3	27,3	21,1	25,5	29,5	34,2
Тамань	23,6	25,8	27,5	29,2	23,6	25,8	27,4	28,9
Мысовое	29,4	34,5	39,1	44,3	29,3	35,8	42,1	49,8
Крымский район								
Клепинено*	19,7	26,9	34,7	45,4	13,9	17,9	21,7	26,3
Ишунь	21,4	24,2	26,3	28,3	21,5	24,3	26,2	28,1
Джанкой*	16,3	24,0	33,5	48,0	12,5	15,8	18,7	22,0
Владиславовка*	21,5	24,2	26,2	28,1	21,3	25,9	29,8	34,2
Белогорск	17,4	18,7	19,5	20,1	17,6	19,1	20,1	20,9
Почтовое	15,4	16,9	18,1	19,1	15,5	17,0	18,0	19,0
Ангарский перевал*	18,5	24,6	30,8	38,8	12,5	16,1	19,5	23,7
Ай-Петри	38,5	41,1	42,7	44,0	38,8	42,2	44,5	46,5
Никитский сад	22,4	25,0	27,0	28,8	22,5	25,2	27,2	29,1
Евпатория, порт*	26,3	30,5	33,9	37,5	23,9	29,3	34,2	39,8
Алушта*	20,9	26,3	30,8	35,7	12,1	17,5	22,4	28,3
Херсонесский маяк	21,9	23,4	24,3	25,1	22,1	23,6	24,5	25,4
Севастополь	21,2	23,3	24,9	26,4	21,1	23,1	24,4	25,7
Ялта	22,1	25,1	27,2	29,2	22,1	25	27,1	29,1

Примечание: знак «*» означает станции, на которых нестационарная модель параметра μ в GEV-модели оказалась значимой на 5% уровне.

Наибольшие скорости, согласно расчетам, соответствуют Новороссийску, Геленджику и Никитскому саду. Для этих станций развитие штормовых ветров с экстремально высокими значениями скорости получают за счет местных физико-географических условий. В районе Новороссийска экстремальные ветра связывают с развитием боры, в районе Никитского сада резкое усиление ветров происходит при развитии штормов северо-западного направления.

Среди пунктов Азовского моря, наиболее сильно выделяется Мысовое и Мариупольская ГМО, на которых один раз в 50 и 100 лет могут отмечаться ураганные ветры со скоростями более 30 м/с, на станции Мысовое вообще расчетная скорость 1% обеспеченности может достигать значений до 44 м/с. Но если в Мысовом ряд наблюдений за скоростью ветра является однородным, то в ряду Мариупольской ГМО был выявлен сдвиг неоднородности, связанный с переносом метеорологической площадки, и который потенциально может повлиять на результат расчета.

Для Крымского района расчетные скорости V_{100} могут варьировать от 18 до 48 м/с, хотя известно, что среднегодовая и среднемесячная скорость ветра на ЮБК обычно значительно меньше, чем по другим районам. Такой разброс вероятных скоростей редкой повторяемости является прямым следствием оротографических особенностей Крыма, обладающего разнообразием физико-географических условий формирования ветрового режима. Крымские горы являются естественным препятствием для воздушных масс. При их перемещении над горной системой создаются сложные системы циркуляции и условия для развития локальных кататических и периодических ветров [11]. В частности, зимой при таких переносах в тылу холодного фронта наблюдается сильный порывистый ветер северо-западного направления, с которым связано наибольшее число опасных явлений сильного ветра на территории Крыма [12] в особенности на станциях Ялта, Никитский сад, Алушта, Ай-Петри.

Для северо-западного района Черноморского побережья вероятные средние скорости V_{50} и V_{100} лежат в пределах 21–36 м/с. Наибольшие значения вероятных скоростей ветра характерны для станций Черноморское и Хорлы. Стоит, правда, акцентировать внимание на том, что на станции Черноморское в 1989 г. была перенесена метеорологическая площадка на 1,5 км вглубь полуострова. Несмотря на попытку статистического устранения связанной с этим неоднородности, к оценкам скоростей по станции Черноморское за столь длительный период 1958–2013 гг. следует относиться с осторожностью. В ряду по станции Хорлы при предварительном анализе также была отмечена неоднородность, проявляющаяся в виде статистически значимого сдвига скоростей, который, однако, не был подтвержден метаданными, а потому не был устранен.

Наименьшие из расчетных значений экстремальных скоростей V_{50} и V_{100} соответствует следующим станциям: северо-западный район – Очаков (21–22 м/с), Керчь-Туапсинский район – Феодосия (25–26 м/с), Азовское побережье – Таганрог (25–27 м/с), Крымский район – Почтовое (18–19 м/с).

Полученные оценки скоростей ветра редкой повторяемости, вообще говоря, не совпадают с аналогичными оценками, представленными в ряде работ последнего десятилетия. Так в [1] вероятные скорости ветра для некоторых черноморских станций оказались выше или такими же, как и в открытой части Черного моря (1 раз в 100 лет возможна скорость ветра 40 м/с согласно той же работе [1]). Хотя известно, что в открытой части моря скорость ветра больше, чем на побережье, прежде всего вследствие меньшей шероховатости подстилающей водной поверхности по сравнению с сушей. Кроме того, при оценках величин скоростей ветра ранее использовались более длинные, но неоднородные ряды данных по ветру, что могло также повлиять на величину расчетных характеристик (см. [4]).

Нестационарная оценка экстремальных скоростей. В последние десятилетия в Азово-Черноморском регионе

отмечается выраженный отрицательный тренд средних скоростей ветра. Как правило, возникновение нестационарности гидрометеорологических рядов обусловлено долговременной эволюцией крупномасштабных процессов в глобальной климатической системе. Фактор климатической нестационарности рядов определяет достоверность статистических оценок экстремумов скорости ветра при использовании предельных распределений. В частности, стационарные оценки, представленные ранее в работе, по некоторым станциям могут быть существенно завышены/занижены. Нами был выполнен расчет экстремальных характеристик режима ветра с использованием нестационарной модели GEV в предположении временной зависимости параметра положения экстремума μ :

$$\mu = \mu_0 + \mu_1 t.$$

Расчет по метеорологическим станциям выбранного региона показал, что для 13 из 33, т.е. более трети станций региона нестационарная модель пара-

метра локализации экстремума в GEV-модели оказалась значимой (μ_1 значим на 5% уровне).

Пример нестационарной оценки средней скорости ветра редкой повторяемости представлен на рис. 1 для двух станций – Клепинено и Ангарский перевал. В зависимости от фазы изменения ветрового климата в регионе, статистические оценки приобретают разные значения.

Согласно рис.1, в последние четыре десятилетия снизилась вероятность возникновения экстремальных ветров, по крайней мере, в районе двух указанных станций. Исходя из этого, в современный климатический период оценочные максимумы скорости ветра должны быть скорректированы на нестационарность ветрового климата. В противном случае, отличия в стационарных и нестационарных оценках экстремальных скоростей V_{50} и V_{100} может достигать 8 м/с (Алушта, Сочи).

Рис. 1. Межгодовой ход наибольших за год значений скорости ветра на метеорологических станциях Клепинено (а) и Ангарский перевал (б) за период 1958-2013 гг. (черная сплошная линия), а также нестационарная оценка скоростей ветра V_{10} (красная линия), V_{50} (зеленая линия) и V_{100} (синяя линия)

Fig. 1. Interannual variations of the highest annual wind speeds at meteorological stations Klepineno (a) and Angarskiy pereval (b) for the period 1958-2013 (black solid line) as well as nonstationary estimates of wind speeds V_{10} (red line), V_{50} (green line), and V_{100} (blue line)

Для станций с выраженной нестационарностью в ряде максимумов скоростей ветра различие и вовсе может достигать аномально высоких значений – от 11 до 26 м/с (Клепинено, Джанкой,

Ангарский перевал). Для этих станций эмпирическая функция распределения максимумов является бимодальной. В отличие от нестационарной, оценка стационарной статистической моделью ста-

новится несостоятельной в таком случае. Ранее в [2] нами были сделаны схожие выводы при исследовании эмпирического распределения больших выборок скоростей ветра за схожий период времени. Статистическое оценивание функцией Вейбулла оказалось также несостоятельным в отличие от функции смеси этих распределений. Несостоятельность функции Вейбулла (вследствие нестационарности временных рядов) создает сложности при расчетах потенциальной выработки энергии ветроэнергетическими установками, в соответствующих методиках эта функция является основополагающей.

Заключение. Результаты настоящей работы свидетельствуют о том, что, по крайней мере, для 13 из 33 станций Азово-Черноморского региона на статистику распределения наибольших скоростей ветра существенное влияние оказывает климатическая нестационарность рядов данных по ветру. Использование стационарных оценок скоростей ветра создаст сложности при инженерном проектировании строительных объектов в окрестности этих станций. Например, при определении типа ветрового района, по которому устанавливается нормативная ветровая нагрузка на здания. Согласно действующему СП 20.13330.2016 (см. п. 11.1.4) для этого требуется рассчитать величину средней скорости V_{50} , достоверность оценки которой, как было показано в работе, зависит от присутствия нестационарности во временных рядах. Таким образом, наличие выраженного тренда и климатообусловленных долгопериодных вариаций в климатических рядах создает острую необходимость их учета при климатическом обеспечении строительства на суше и морских операций в прибрежной зоне, а также при анализе рисков и вероятного ущерба от опасных гидрометеорологических явлений.

Исследование выполнено в рамках научного проекта, поддержанного РФФИ и г. Севастополь (грант № 18-48-920021), и государственного задания Института природно-технических систем по теме № 0012-2019-0007.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Гидрометеорологические условия морей Украины. Т. II Черное море* / Ю.П. Ильин [и др.]. Севастополь: МЧС и НАН Украины, МО УкрНИГМИ. 2012. 420 с.
2. *Ветро-волновые условия прибрежной зоны Азово-Черноморского региона* / Евстигнеев В.П. [и др.]. Севастополь: ИПТС. 2017. 320 с.
3. *van Vledder G.Ph., Akpinar A. Wave model predictions in the Black Sea: Sensitivity to wind fields* // Appl. Ocean Res. 2015. Vol. 53. P. 161–178.
4. *Onea F., Raileanu A., Rusu E. Evaluation of the Wind Energy Potential in the Coastal Environment of Two Enclosed Seas* // Adv. Meteorol. 2015. Vol. 2015, P. 808617.
5. *Ветер и волны в океанах и морях. Справочные данные. Регистр СССР* / ред. И.Н. Давидан, Л.И. Лопатухин, В.А. Рожков. Л.: Транспорт. 1974. 359 с.
6. *Ефимов В.В., Комаровская О.И. Атлас экстремального ветрового волнения Черного моря. Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ – Гидрофизика». 2009. 60 с.*
7. *Горячкин Ю.Н., Репетин Л.Н. Штормовой ветро-волновой режим у Черноморского побережья Крыма* // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. 2009. Вып. 19. С. 56–69.
8. *Wang X.L. Penalized maximal F-test for detecting undocumented mean-shifts without trend-change* // J. Atmos. Oceanic Tech. 2008. Vol. 25 (3). P. 368–384.
9. *Coles S. An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values. Springer-Verlag. 2001. 211 p.*
10. *Generalized maximum likelihood estimators for the nonstationary generalized extreme value model* / S. El Adlouni [et al.] // Water Resour. Res. 2007. Vol. 43. W03410.
11. *Климат и опасные гидрометеорологические явления Крыма* / ред. К.Т. Логвинов, М.Б. Барабаш. Л.: Гидрометиздат. 1982. 318 с.
12. *Опасные метеорологические явления на территории Крымского полуострова в современных климатических условиях* / Евстигнеев В.П. [и др.] // Метеорология и гидрология. 2021. № 7. С. 107–122.

NON-STATIONARY STATISTICAL ESTIMATION OF WIND SPEEDS
OF RARE RECURRENCE IN THE AZOV AND BLACK SEA REGION

V.P. Evstigneev^{1,2}, V.A. Naumova^{1,2}, N.A. Lemesenko³

¹Sevastopol State University, RF, Sevastopol, Universitetskaya St., 33

²Institute of Natural and Technical Systems, RF, Sevastopol, Lenin St., 28

³Saint-Petersburg State University, RF, Saint-Petersburg, Universitetskaya Emb., 7

In the paper statistical distribution of the highest wind speed per year in the Azov and Black Sea region was analyzed using the data of 33 meteorological stations for 1958-2013. A statistical estimation of the wind speed extremes was carried out by approximation of the empirical sample with a function of Generalized distribution of Extreme Values (GEV) and by extrapolating it to the low probabilities region. We used two methodologies and applied statistical distribution functions corresponding to them. The first method is based on the assumption of stationarity of parameters of the GEV function. The second one is based on the non-stationary assumption of time dependence of extremum localization parameter μ . It was found, that for 13 out of 33 stations of the region, non-stationary GEV-function turned out to be adequate to describe extreme wind speeds.

Keywords: wind speed, extreme values distribution function, extremum, non-stationarity of time series, climate change.

REFERENCES

1. Il'in Yu.P., Repetin L.N., Belokopytov V.N., et al. Hydrometeorological conditions of the seas of Ukraine (Gidrometeorologicheskie usloviya morej Ukrainy), Vol. 2 Black Sea, Sevastopol: MChS i NAN Ukrainy, MO UkrNIGMI, 2012, 420 p.
2. Evstigneev V.P., Naumova V.A., Voskresenskaja E.N., et al. Wind-wave conditions of the coastal zone of the Azov-Black Sea region (Vetro-volnovye usloviya pribrezhnoj zony Azovo-Chernomorskogo regiona), Sevastopol: IPTS, 2017, 320 p.
3. van Vledder G. Ph., and Akpinar A. Wave model predictions in the Black Sea: Sensitivity to wind fields. *Appl. Ocean Res.*, 2015, Vol. 53, pp. 161–178.
4. Onea F., Raileanu A., and Rusu E. Evaluation of the Wind Energy Potential in the Coastal Environment of Two Enclosed Seas. *Adv. Meteorol.*, 2015, Vol. 2015, pp. 808617.
5. Davidan I.N., Lopatuhin L.I., and Rozhkov V.A. Wind and waves in the oceans and seas. Reference data. Register of the USSR (Veter i volny v okeanah i morjah. Spravochnye dannye. Registr SSSR), Leningrad: Transport, 1974, 359 p.
6. Efimov V.V., and Komarovskaja O.I. Atlas of extreme wind waves in the Black Sea (Atlas jekstremalnogo vetrovogo volnenija Chernogo morja), Sevastopol: NPC «JeKOSI – Gidrofizika», 2009, 60 p.
7. Gorjachkin Yu.N., and Repetin L.N. Storm wind-wave conditions off the Black Sea coast of Crimea (Shtormovoj vetro-volnovoj rezhim u Chernomorskogo poberezh'ja Kryma). *Jekologicheskaja bezopasnost' pribrezhnoj i shel'fovoj zon i kompleksnoe ispol'zovanie resursov shel'fa*, 2009, Iss.19, pp. 56–69.
8. Wang X.L. Penalized maximal F-test for detecting undocumented mean-shifts without trend-change. *J. Atmos. Oceanic Tech.*, 2008, Vol. 25, Iss. 3, pp. 368–384.
9. Coles S. An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values, Springer-Verlag, 2001, 211 p.
10. El Adlouni S., et al. Generalized maximum likelihood estimators for the nonstationary generalized extreme value model. *Water Resour. Res.*, 2007, Vol. 43, pp. W03410.
11. Logvinov K.T., and Barabash M.B. Climate and dangerous hydrometeorological phenomena in the Crimea (Klimat i opasnye gidrometeorologicheskie javlenija Kryma), Leningrad: Gidrometizdat, 1982, 318 p.
12. Evstigneev V.P., Naumova V.A., Evstigneev M.P., and Ljubeckaja E.P. Dangerous meteorological phenomena on the territory of the Crimean peninsula in current climatic conditions (Opasnye meteorologicheskie javlenija na territorii Krymskogo poluostrova v sovremennyh klimaticheskikh uslovijah). *Meteorologija i gidrologija*, 2021, No. 7, pp. 107–122.