

Л.Н.Репетин*, В.Н.Белокопытов**

**Морское отделение Украинского научно-исследовательского
гидрометеорологического института, г.Севастополь*

***Морской гидрофизический институт НАН Украины, г.Севастополь*

РЕЖИМ ВЕТРА СЕВЕРО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ ЧЕРНОГО МОРЯ И ЕГО КЛИМАТИЧЕСКИЕ ИЗМЕНЕНИЯ

Приведены современные оценки параметров режима ветра северо-западной части Черного моря, рассчитанные по данным 10 береговых станций на основе срочных натурных наблюдений (1945 – 2005 гг.), средних годовых и месячных величин (1892 – 2005 гг.), а также для морской акватории по данным полей давления и ветра (1960 – 1998 гг.). Обсуждаются особенности внутригодовой и пространственной изменчивости средних и экстремальных характеристик ветра. Исследована межгодовая изменчивость средних годовых и месячных значений скорости ветра, а также величин повторяемости различных градаций скорости ветра. Значимые отрицательные линейные тренды 80 – 100-летних рядов указывают на общее уменьшение средней скорости ветра и повторяемости штормов в прибрежной зоне северо-западного региона Черного моря в XX в. Приведены характеристики наиболее жесточайших штормов, наблюдавшихся в северо-западной части моря.

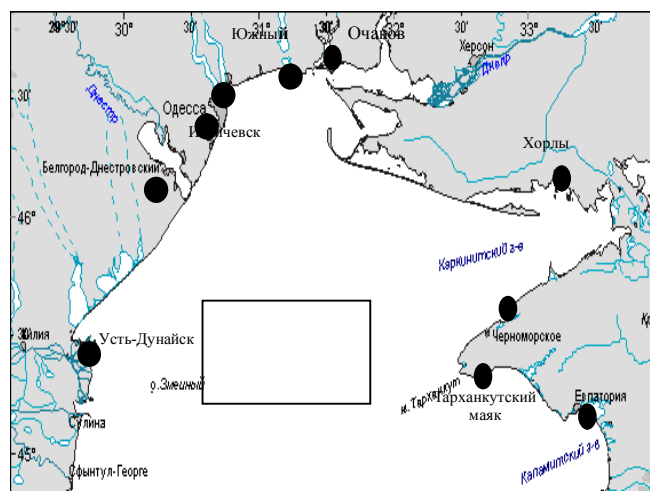
Несмотря на наличие многочисленной справочной литературы с данными о режиме ветра над открытой частью и отдельными участками побережья Черного моря, опубликованные обобщения натурных данных соответствуют уровню знаний и информационным массивам 60 – 80-х гг. Данные о ветровом режиме Черного моря, в том числе его северо-западной части (СЗЧ), приводятся в ряде климатических пособий. Подробный анализ ветровых условий за период наблюдений с 1936 по 1965 гг. представлен в [1]. В [2] средние многолетние характеристики ветра уточнялись с использованием данных за период с 1972 по 1985 гг. По объему материала и степени анализа гидрометеорологических условий эти две работы являются основными режимно-климатическими пособиями для Черноморского региона. Некоторая информация о климатических характеристиках ветра на черноморском побережье Украины, рассчитанных за период 1960 – 1990 гг., приводится в монографии «Климат Украины» [3].

В условиях глобального потепления климата в последние 20 – 25 лет, которые оказались аномальными по отношению к вековым рядам, актуальность проблемы изменений ветрового режима морских регионов значительно возросла. По литературным источникам отмечается тенденция уменьшения скорости приземного ветра в XX в. для разных регионов СНГ, в частности, на севере Евразийского континента [4], на южном побережье Крыма [5 – 7]. В связи с этим, представляется важным получить количественные оценки климатических изменений скорости ветра в СЗЧ, уточнить средне-многолетние нормы, используемые при проектировании гидротехнических и других сооружений. Касательное ветровое напряжение на поверхности моря является главной движущей силой для ветрового волнения и цир-

куляции вод. Оно определяет степень воздействия штормовых волн на побережье, морской транспорт, нефтегазовые гидротехнические сооружения, а также обуславливает ветровой дрейф в верхнем слое моря и, в целом, течения в масштабах всего морского бассейна. Под влиянием вдольбереговых ветров возникают сгонно-нагонные явления, процессы апвеллинга, которые приводят к колебаниям уровня моря и быстрым изменениям температуры воды – от 20 – 25 до 8 – 12 °С, неблагоприятным для рекреационного использования прибрежной зоны. Подъемы уровня приводят к подтоплению берегов, оползням, а штормовое волнение на фоне повышенного уровня усугубляет обрушение берегов и построек. Возникающие при апвеллингах динамические возмущения в прибрежной зоне приводят к подъему на поверхность не только холодных, но и загрязненных вод в местах глубоководных выпусков техногенных и сточных вод, или, наоборот, способствуют водообмену с открытым морем и очищению прибрежных вод. Таким образом, ветровые условия оказывают влияние на процессы самоочищения и, тем самым, на качество вод бухт и прибрежной зоны, их экологическое состояние.

В основу работы положены данные географической информационной системы (ГИС) «Гидрометеорология Черного и Азовского морей», созданной в МО УкрНИГМИ [8], в которой систематизирована основная информация по наблюдениям на береговых станциях и экспедиционных судах.

Использованные материалы. В данной работе использованы материалы многолетних регулярных наблюдений над ветром в прибрежной зоне СЗЧ, которые проводились на морской сети станций Гидрометслужбы Украины в период с 1887 по 2005 гг. Для анализа были выбраны 10 репрезентативных станций на побережье СЗЧ (рис.1) с продолжительностью наблюдений от 22 до 100 лет, представляющих все характерные районы северо-западного побережья моря (табл.1). На береговых станциях измерения скорости и направления ветра производились с применением сначала флюгеров с легкой и тяжелой досками, а затем, с 1978 г., стандартными анеморумбометрами ГМ-63. В течение длительного периода наблюдений на станциях изменялись не только ветроизмерительные приборы, но и высота их установки, местоположение метеорологических площадок и их защищенность в результате застройки или роста деревьев. Насколько велико влияние этих методических и антропогенных факторов на результаты измерений и не являются ли они



Р и с . 1 . Расположение береговых гидрометеорологических станций. Прямоугольником выделен район, где ветер рассчитывался по полям атмосферного давления.

Т а б л и ц а 1. Береговые станции, периоды, продолжительность измерений и средняя скорость ветра.

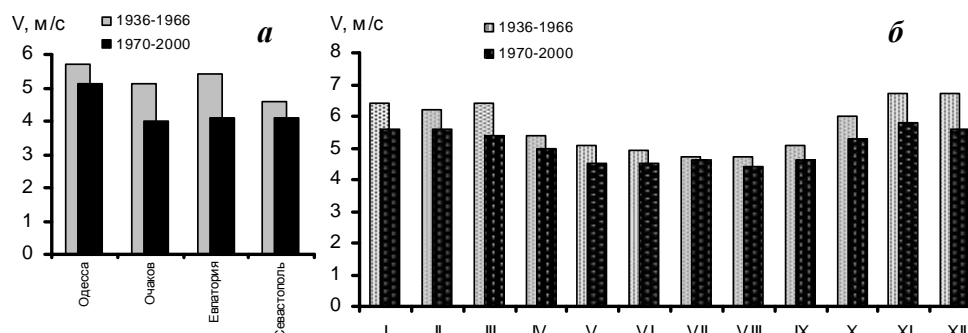
станция	период, гг.	среднеме- сячных, лет	срочных, лет	средняя скорость, м/с
Усть-Дунайск	1983 – 2005	22	22	5,3
Белгород-Днестровский	1945 – 2005	52	52	4,1
Ильичевск	1960 – 2005	45	45	4,0
Одесса	1915 – 2005	90	60	5,5
Южный	1980 – 2005	25	25	4,7
Очаков	1924 – 2005	81	55	4,5
Хорлы	1905 – 2005	100	60	5,2
Черноморское	1928 – 2005	77	58	5,0
Тарханкутский маяк	1887 – 1995	87	87	4,6
Евпатория	1915 – 2005	90	60	4,5

причиной уменьшения скорости ветра? Эта проблема подробно рассматривалась специалистами научно-методических и научных учреждений гидрометслужбы России на материалах срочных наблюдений 23 континентальных и береговых (северные моря) станций [4].

В результате анализа сделан вывод о том, что помимо методических причин и антропогенного влияния, повсеместное уменьшение скорости ветра в течение длительного периода может определяться изменениями климата. Такой же вывод сделан на основании анализа данных о ветрах в прибрежной зоне Крыма [5 – 7]. Станции на побережье Черного моря являются частью сети гидрометслужбы бывшего СССР (как и станции других стран СНГ), измерители ветра заменялись на всей сети примерно в одно время, методика и средства измерений ветра до настоящего времени нигде не изменились, поэтому упомянутые методические выводы вполне применимы и к метеорологическим станциям Азово-Черноморского бассейна. Дополнительным доводом, подтверждающим достоверность общего уменьшения скорости приземного ветра в Черноморском регионе, является очевидная тенденция снижения, за те же периоды, повторяемости штормового волнения на большей части волномерных постов морской сети Украины [5 – 7], наблюдения на которых независимы от измерений ветра. Тем не менее, нами была предпринята попытка приведения данных, измеренных по флюгеру, к анемометрическим с использованием коэффициентов, опубликованных в [4].

В ряде таблиц и графиков совмещены данные станций, имеющих разные периоды наблюдений для представления, по возможности, полной информации выбранных станций. При климатических оценках это учитывалось, расчеты и сравнения трендов проводились только по синхронным рядам наблюдений.

Для характеристики ветровых условий в открытой части СЗЧ был использован цифровой массив атмосферного давления и расчетного ветра над Черным морем. Массив составлен по данным кольцевых синоптических



Р и с . 2. Соотношение среднемноголетних величин скорости ветра на береговых станциях (а) и годовой ход среднемноголетней скорости ветра на станции Одесса (б) за различные 30-летние климатические периоды.

карт в узлах регулярной сетки $20' \times 30'$ для каждых суток за период 1960 – 1998 гг. Приводный ветер рассчитывался согласно методике, изложенной в Руководстве [9]. В таблицах и на графиках данные расчетного района на шельфе СЗЧ (рис.1) представлены под названием «море».

Скорость ветра. Северо-западная часть Черного моря характеризуется интенсивной штормовой деятельностью. Большие скорости ветра отмечаются практически во всех частях побережья и во все сезоны года. Тем не менее, выделяются зоны повышенной ветровой активности, где среднемноголетние значения скорости ветра превышают 5 м/с (Усть-Дунайск, Одесса, Хорлы, табл.1, 2). Однако самые сильные ветры наблюдаются над открытой частью моря, в районах о.Змеиный (6,7 м/с) и устья Дуная (Сулина), где среднегодовая скорость достигает 7,4 м/с [1, 2]. При сравнении *климатических норм* скорости ветра за различные периоды оказалось, что средние величины, вычисленные по рядам за 30-летний климатический период 1970 – 2000 гг. существенно ниже, чем за расчетные периоды 1936 – 1966 гг. [1] и 1971 – 1980 гг. [2]. Рис.2, а наглядно показывает, что на станциях северо-западного региона нормы уменьшились на 0,5 – 1,3 м/с, в среднем для представленного ряда станций на 0,9 м/с. Характер среднемесячных различий за указанные периоды на примере станции Одесса показан на рис.2, б. Подавляющая часть месячных норм скорости ветра ниже ранее опубликованных. Причины различия среднемноголетних норм скорости ветра обсуждаются ниже. Средние годовые и месячные скорости ветра, их среднеквадратичные отклонения, а также экстремальные значения по рассматриваемым станциям СЗЧ представлены в табл.2.

Скорость ветра имеет хорошо выраженный годовой ход с максимумом в холодный период и минимумом в теплый. На рис.3, а приведены среднемноголетние месячные величины скорости ветра. Этот рисунок позволяет оценить амплитуды пространственных и сезонных изменений средней скорости ветра исследуемого региона. Зимой в прибрежной зоне СЗЧ диапазон значений средней скорости ветра составляет 5,0 – 6,4 м/с, летом, соответственно, 3,3 – 4,6 м/с. Аналогичные графики для среднеквадратичных отклонений (с.к.о.) среднемесячной скорости ветра характеризуют долгопериодную изменчивость (рис.3, б). Скорость ветра в районе каждой станции зависит не только от времени года, но и от условий окружающего станцию релье-

Таблица 2. Среднемесячные и среднегодовые скорости ветра на береговых станциях северо-западной части Черного моря.

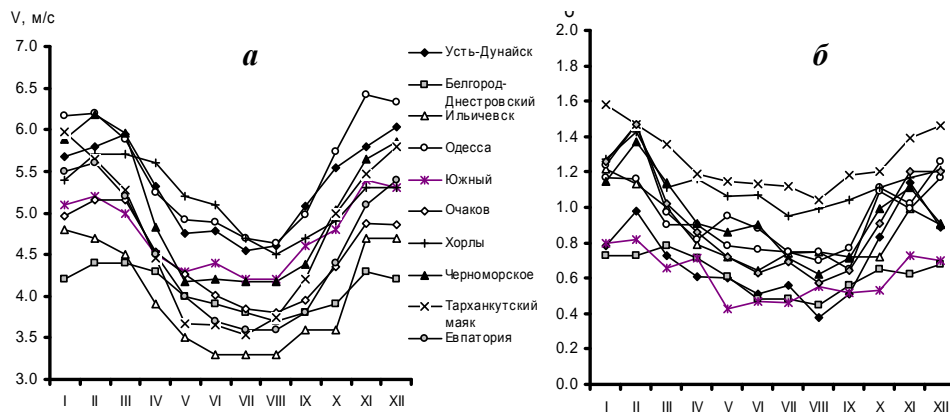
месяц	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	год
Усть-Дунайск, 1984 – 2005 гг.													
среднее	5,7	5,8	5,9	5,3	4,8	4,8	4,6	4,6	5,1	5,6	5,8	6,0	5,3
с.к.о.	0,78	0,98	0,73	0,61	0,60	0,51	0,56	0,38	0,51	0,83	1,14	0,89	0,36
минимум	3,5	4,3	4,8	4,1	3,5	3,6	3,3	3,9	3,8	4,4	4,1	4,3	4,6
максимум	6,7	8,1	7,5	6,7	5,8	5,8	5,4	5,1	5,8	7,2	8,7	7,4	5,8
максимум абс.	22	20	22	16	20	16	17	15	20	23	20	25	25
Белгород-Днестровский, 1945 – 2005 гг.													
среднее	4,2	4,4	4,4	4,3	4,0	3,9	3,8	3,7	3,8	3,9	4,3	4,2	4,1
с.к.о.	0,73	0,73	0,78	0,71	0,61	0,48	0,48	0,45	0,56	0,65	0,62	0,68	0,31
минимум	2,2	3,1	2,6	2,9	3,2	3,0	2,5	2,8	2,8	2,9	3,0	2,6	3,4
максимум	6,2	5,8	5,9	6,1	6,0	5,0	4,9	4,9	5,7	5,3	5,5	6,8	5,1
максимум абс.	20	20	25	24	20	20	18	17	17	17	22	20	25
Ильичевск, 1961 – 2005 гг.													
среднее	4,8	4,7	4,5	3,9	3,5	3,3	3,3	3,3	3,6	3,6	4,7	4,7	4,0
с.к.о.	1,22	1,13	1	0,79	0,72	0,64	0,74	0,75	0,72	0,72	0,99	0,9	0,66
минимум	2,6	1,9	2,4	2,4	1,8	1,7	1,6	1,4	2,3	2,3	2,7	2,7	2,9
максимум	8,0	8,2	6,5	5,6	5,2	4,7	4,9	4,8	5,4	5,4	7,4	7,3	5,5
максимум абс.	25	20	20	20	16	15	22	14	20	19	27	25	27
Одесса, 1915 – 2005 гг.													
среднее	6,2	6,2	5,9	5,2	4,9	4,9	4,7	4,6	5,0	5,7	6,4	6,3	5,5
с.к.о.	1,17	1,16	0,90	0,90	0,78	0,76	0,75	0,70	0,77	1,11	1,02	1,26	0,69
минимум	3,1	3,8	3,6	3,2	3,3	3,5	3,0	3,3	3,4	3,9	4,0	3,5	4,2
максимум	9,7	9,7	7,8	7,6	6,9	6,7	6,3	6,6	6,9	8,8	9,1	9,8	6,7
максимум абс.	20	18	20	20	16	18	18	22	24	20	26	20	26
Южный, 1981 – 2005 гг.													
среднее	5,1	5,2	5,0	4,5	4,3	4,4	4,2	4,2	4,6	4,8	5,4	5,3	4,7
с.к.о.	0,80	0,82	0,66	0,71	0,43	0,47	0,46	0,55	0,52	0,53	0,73	0,70	0,31
минимум	3,4	3,5	3,1	3,1	3,5	3,5	3,2	2,8	3,2	3,6	3,1	3,8	3,7
максимум	6,7	7,0	6,0	5,9	4,9	5,6	5,1	4,9	5,3	5,8	6,5	6,6	5,0
максимум абс.	20	18	16	18	16	15	15	15	17	16	18	16	20
Очаков, 1926 – 2005 гг.													
среднее	5,0	5,2	5,2	4,5	4,3	4,0	3,9	3,8	4,0	4,4	4,9	4,9	4,5
с.к.о.	1,24	1,47	1,47	0,82	0,95	0,88	0,75	0,75	0,65	1,09	0,99	1,17	0,73
минимум	1,9	1,8	1,8	1,9	1,5	2,4	2,2	2,4	2,5	2,7	3,0	2,1	3,0
максимум	8,5	8,8	8,8	6,5	6,4	5,5	5,8	6,0	5,6	7,8	7,8	8,2	6,4
максимум абс.	18	20	20	20	16	16	16	18	18	24	18	18	24

Продолжение таблицы 2.

месяц	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	год
Хорлы, 1905 – 2005 гг.													
среднее	5,4	5,7	5,7	5,6	5,2	5,1	4,7	4,5	4,7	4,9	5,3	5,3	5,2
с.к.о.	1,27	1,43	1,11	1,16	1,06	1,07	0,95	0,99	1,04	1,11	1,17	1,21	0,87
минимум	2,4	3,3	3,3	3,5	3,2	3,2	2,9	2,5	2,9	2,8	3,1	2,6	3,6
максимум	8,6	11,0	8,8	9,0	8,0	8,0	7,2	6,8	7,1	7,3	9,0	8,0	7,2
максимум абс.	24	24	24	20	18	17	16	25	20	22	34	17	34
Черноморское, 1928 – 2005 гг.													
среднее	5,9	6,2	6,0	4,8	4,2	4,2	4,2	4,2	4,4	5,0	5,6	5,9	5,0
с.к.о.	1,15	1,37	1,14	0,91	0,86	0,9	0,71	0,62	0,71	0,99	1,11	0,91	0,61
минимум	3,3	3,9	3,7	3,1	2,4	2,6	2,6	3,0	3,0	3,1	3,4	4,0	3,8
максимум	8,7	9,8	9,9	7,2	7,7	7,3	6,1	5,6	6,8	7,9	9,3	7,9	7,0
максимум абс.	22	28	24	20	20	20	60	20	23	24	24	20	60
Тарханкутский маяк, 1887 – 1995 гг.													
среднее	6,0	5,7	5,3	4,5	3,7	3,7	3,5	3,8	4,2	5,0	5,5	5,8	4,6
с.к.о.	1,58	1,47	1,36	1,19	1,15	1,13	1,12	1,04	1,18	1,20	1,39	1,46	0,99
минимум	2,6	2,6	1,3	1,4	0,8	0,8	0,8	1,2	1,2	2,7	1,9	2,0	2,5
максимум	10,5	9,4	8,9	7,1	6,4	6,4	6,5	6,1	7,0	7,8	10,3	9,2	7,5
максимум абс.	28	28	32	24	26	25	20	20	23	26	30	37	37
Евпатория, 1915 – 2005 гг.													
среднее	5,5	5,6	5,2	4,5	4,0	3,7	3,6	3,6	3,8	4,4	5,1	5,4	4,5
с.к.о.	1,26	1,47	1,02	0,86	0,72	0,63	0,69	0,57	0,64	0,91	1,2	1,2	0,54
минимум	3,4	3,3	3,7	2,8	2,4	2,5	2,1	2,3	1,9	2,4	2,6	3,4	3,1
максимум	9,1	11,4	8,6	7,4	6,2	5,4	5,0	5,6	5,6	7,6	8,91	8,8	5,7
максимум абс.	28	28	28	24	20	18	18	24	25	25	25	25	28

фа побережья. Поэтому на таких открытых станциях как Хорлы, Евпатория и Тарханкутский маяк в наиболее ветреные годы среднемесячные скорости ветра зимой достигают 9,0 – 11,4 м/с, т.е. в холодный период ветры штормовой силы могут действовать на протяжении всего месяца (табл.2). Максимальные среднемесячные скорости чаще всего наблюдаются в ноябре – марте. Штормовые ветры ≥ 20 м/с бывают в любое время года и в любом районе побережья. Максимальные скорости зимой и весной могут достигать 25 – 30 м/с. Полученные по срочным наблюдениям максимальные скорости ветра в районах Одессы и м.Тарханкут достигали 37 – 40 м/с.

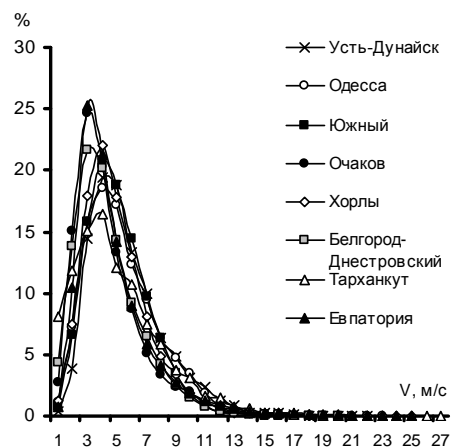
Среднее число дней с сильным ветром (≥ 15 м/с) изменяется от 20 – 22 дней в Усть-Дунайске до 38 – 39 в районах Одессы и Хорлов. К ветровым условиям открытых районов Черного моря, наиболее близки условия станций, расположенных на далеко выдающихся в море мысах (Тарханкут) или на открытых равнинных побережьях (Евпатория).



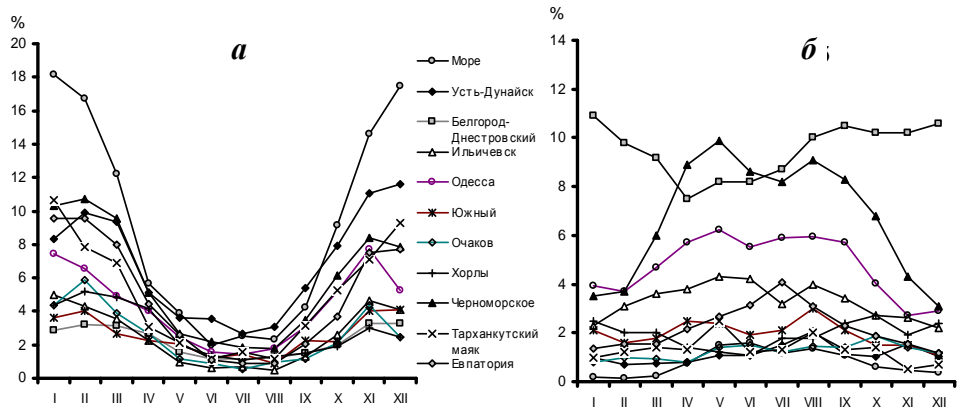
Р и с . 3 . Годовой ход скорости ветра (а) и с.к.о. (б) на береговых станциях северо-западной части Черного моря.

Наряду со средними и максимальными величинами скорости ветра практический интерес представляют сведения о **повторяемости** различных градаций скорости. Кривые распределения повторяемости скорости ветра (рис.4), рассчитанные по рядам среднесуточных значений с интервалом в 1 м/с, показывают, что наибольшая суммарная повторяемость слабых ветров (0 – 5 м/с) отмечена в Очакове (76 %), Белгород-Днестровске (74 %) и Евпатории (72 %). Наибольшая суммарная повторяемость ветров ≥ 10 м/с отмечена в районах Усть-Дунайска (8,7 %), мыса Тарханкут (8,5 %), Одессы (7,3 %) и Евпатории (6,2 %). Ветры ураганной силы, скорость которых превышает 25 м/с имеют небольшую повторяемость (0,01 – 0,2 %) и наблюдались, в основном, в районе мыса Тарханкут (8 сут), Одессе и Евпатории (5 сут) за периоды наблюдений, указанные в табл.1. Сезонные изменения повторяемости сильных ветров (≥ 10 м/с) и случаев отсутствия ветра (штилей) показаны на рис.5. Сезон с наибольшей повторяемостью штормовых ветров также соответствует холодному периоду года с октября по март. В этот период повторяемость случаев сильных ветров изменяется от 3 – 4 % в районах лиманов (Очаков, Ильичевск, Южный) до 14 – 18 % в открытой части северо-западного шельфа. В период с мая по август повторяемость штормов уменьшается до 0,5 – 3,0 % (рис.5, а).

Летом на побережье СЗЧ преобладает маловетренная погода, когда повторяемость ветра до 5 м/с составляет 60 – 70 % всех наблюдений. Однако случаи полного штиля на открытых участках побережья очень редки. Например, в районе м.Тарханкут повторяемость штилей в течение всего года всего 0,5 – 2,5 %, а на большей части станций от 0,2 до 4,1 %. Только в Днепро-Бугском лимане, в районе Одессы и на юге Каркинитского залива



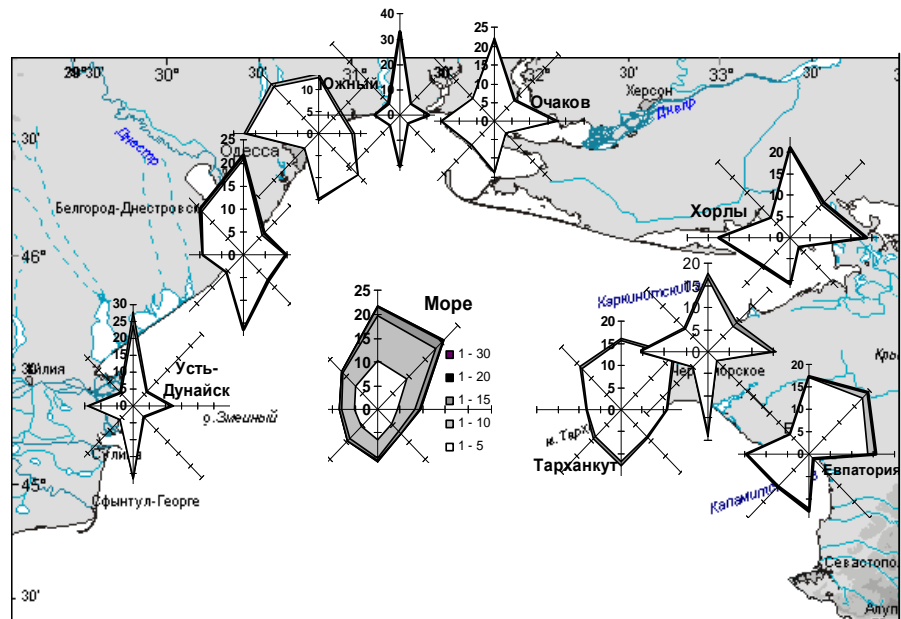
Р и с . 4 . Повторяемость среднесуточной скорости ветра.



Р и с . 5 . Годовой ход повторяемости (%) штормового ветра (> 10 м/с, *а*) и штилей (*б*) на береговых станциях северо-западной части Черного моря.

(Черноморское) повторяемость штилей в теплый период достигает 6 – 11 % (рис.5, *б*). Небольшая повторяемость штилей связана с бризовой циркуляцией в прибрежной зоне, в результате которой днем ветры дуют с более прохладной водной поверхности на сильно прогретый берег, а ночью – с берега. Наблюдаются бризы с апреля по октябрь, но их наибольшей повторяемостью характеризуются июль и август, когда бризовые ситуации могут удерживаться более половины месяца.

Направления ветра. Основные направления ветра над Черным морем, определяются распределением атмосферного давления в различные сезоны года. В холодное время года под влиянием циклонических областей над Средиземным и Черным морями преобладает перенос континентального полярного воздуха, сопровождающийся северо-восточными, северными и



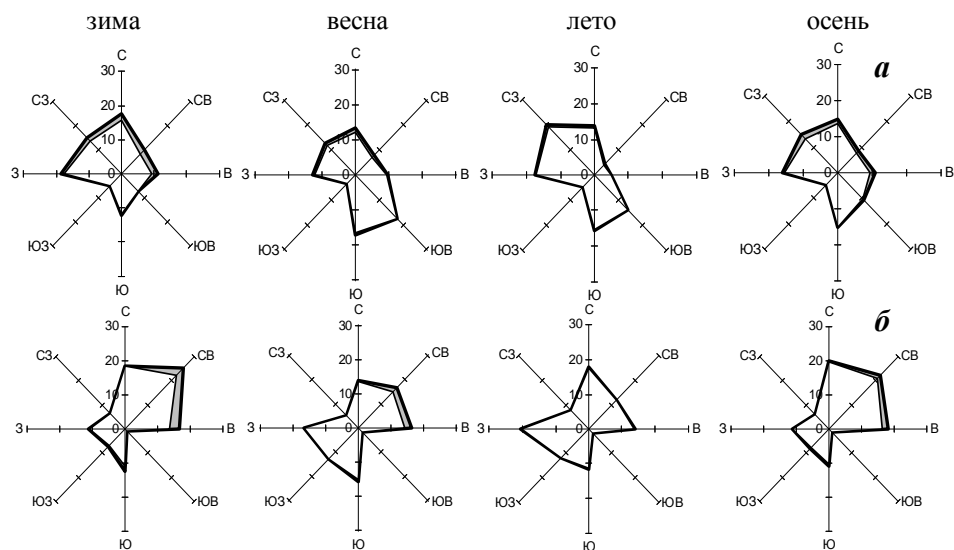
Р и с . 6 . Розы повторяемости (%) ветра по направлениям на береговых станциях и в центре северо-западной части Черного моря.

северо-западными ветрами. Летом преобладающее влияние Азорского максимума вызывает западные, юго-западные и южные ветры [1].

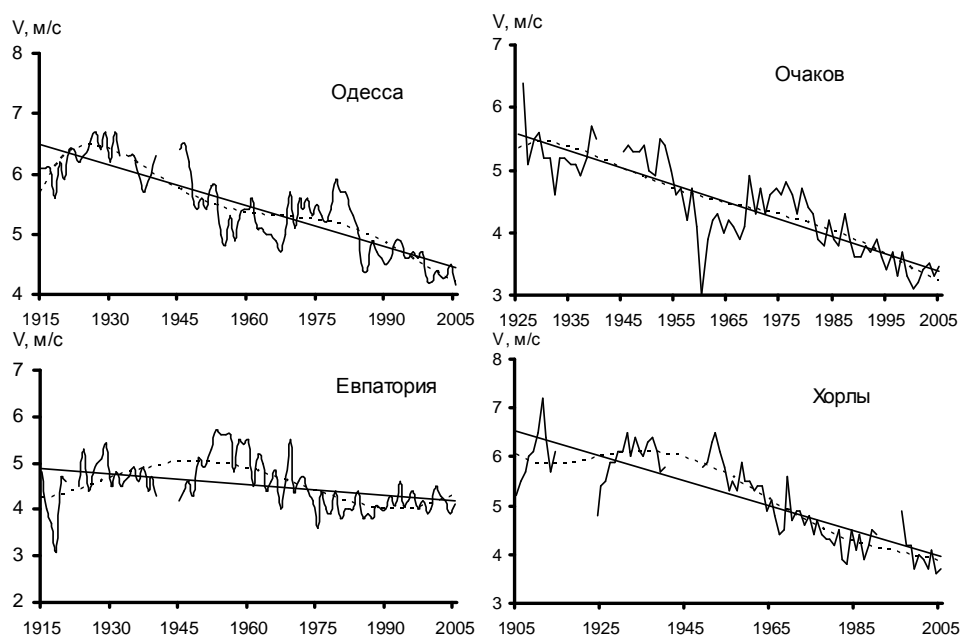
Особенности ветрового режима связаны не только с общециркуляционными синоптическими процессами, но с рельефом, ориентацией и конфигурацией берегов отдельных регионов прибрежной зоны, поэтому СЗЧ имеет свои особенности. На рис.6 представлены средние годовые розы повторяемости ветра по направлениям, на которых изображены контуры линий суммарной повторяемости для всех градаций и линий, соответствующих повторяемости ветров < 10 м/с. Заштрихованные между ними области соответствуют величинам повторяемости штормовых ветров (≥ 10 м/с). В равнинных районах юга Украины и западного побережья Крыма преобладают северные (16 – 33 %), северо-восточные (10 – 20 %), восточные (10 – 20 %) и южные (10 – 22 %) направления ветра. Сезонные изменения повторяемости ветров по основным 8 румбам представлены на рис.7.

Межгодовая изменчивость. Для анализа временных изменений ветрового режима в северо-западной части Черного моря использовались наиболее длинные ряды средней скорости ветра, ряды величин годовой повторяемости разных градаций скорости ветра. Для расчета повторяемости (%) использовались массивы срочных (3 – 4 срока в сутки) измерений скорости и направления ветра, продолжительностью от 45 до 60 лет в период с 1945 по 2005 гг. (табл.1).

Для исследования межгодовой изменчивости *средней скорости* ветра V анализировались ряды средних годовых и средних месячных величин. В основном, ряды не имеют перерывов (за исключением станции Хорлы), кроме 3 – 4 лет периода Великой Отечественной войны, когда наблюдения на всех станциях не производились. На рис.8 представлены графики межгодовой изменчивости средней скорости ветра на станциях с наиболее длинными рядами измерений. Эти ряды, как и ряды других станций СЗЧ аппроксими-



Р и с . 7. Сезонные розы повторяемости (%) ветра на станциях Одесса (а), Евпатория (б), рассчитанные за период 1945 – 2005 гг.



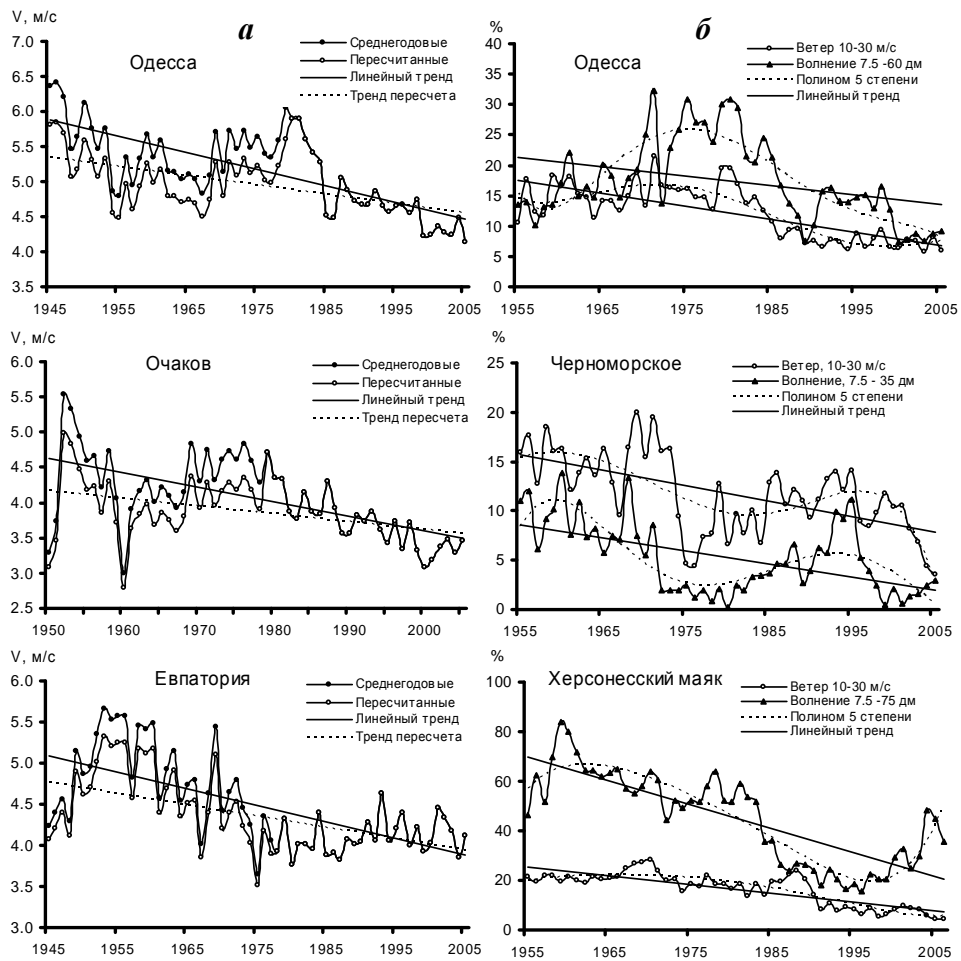
Р и с . 8 . Межгодовые изменения среднегодовых величин скорости ветра на станциях северо-западного побережьях Черного моря.

руются очевидными отрицательными линейными трендами.

Поскольку ряды неоднородные (измерения проводились по флюгеру или анемометру), есть основания для сомнений, не является ли неоднородность измерений главной причиной уменьшения скорости ветра. Чтобы оценить величину возможных изменений скорости ветра на черноморском побережье за счет замен флюгеров на анемометры, которые проводились в 70 – 80-х гг., были проведены тестовые перерасчеты скорости ветра. Для этого ряды срочных измерений скорости ветра по флюгеру на станциях Одесса, Очаков и Евпатория были пересчитаны с использованием коэффициентов, эмпирически обоснованных в [4]. В этой работе показано, что коэффициенты пересчета скорости ветра, измеренной анемометром V_a , к флюгеру V_f изменяются от $V_a/V_f = 0,8$ до 1,0 и в большинстве случаев разница измерений составляет 1 м/с, поэтому результаты измерений до $V = 14$ м/с различаются мало. При больших скоростях ветра различия увеличиваются до 2 – 3 м/с, но практически на всех станциях повторяемость скорости ветра >10 м/с исчисляется несколькими процентами. Повторяемость $V > 15$ м/с еще меньше, при этом она уменьшается от начала к концу рядов.

Фактические и пересчитанные с применением указанных коэффициентов ряды среднегодовых величин скорости ветра на станциях Одесса, Очаков и Евпатория представлены на рис.9, а. И те, и другие аппроксимируются значимыми отрицательными линейными трендами. Однако, угловые коэффициенты трендов T пересчитанных рядов и их размах Δ (табл.3) почти вдвое меньше фактических и нет уверенности в том, что использованные коэффициенты пересчета оптимальны для черноморского региона.

Поскольку ветер определяет интенсивность волнения моря, попробуем сравнить тенденции межгодовой изменчивости повторяемости сильных



Р и с . 9 . Межгодовая изменчивость средней скорости ветра (а), а также повторяемости сильного (≥ 10 м/с) ветра и волнения ≥ 75 см (б).

ветров и штормового волнения, способы измерения которого независимы от измерений ветра. С этой целью были рассчитаны годовые величины повторяемости умеренного и штормового волнения (≥ 3 балла) по данным наиболее репрезентативных волномерных постов Одесса, Черноморское и Херсонесский маяк. На рис.9, б совмещены графики годовых величин повторяемости волнения и сильного ветра (≥ 10 м/с), вычисленных по фактическим данным за синхронные периоды, которые указывают на аналогичные тенденции и близкие величины угловых коэффициентов линейных трендов. Для анализа линейных трендов (T) и оценки их статистической значимости использовался набор статистических параметров, расчетом которых обычно сопровождается оценка коэффициентов уравнения линейной регрессии, описывающих наклон линии тренда. При этом рассчитывались отношение величины коэффициента наклона к стандартной ошибке его определения (t -статистика), отношение F среднего квадрата значений V , описываемых регрессией, к среднему квадрату остатков и коэффициент детерминации R^2 характеризующий долю дисперсии, учитываемой аппроксимирующей зави-

симостью, в суммарной дисперсии ряда. При найденных для каждого тренда величинах t и F с помощью соответствующих распределений вероятности находились величины значимости оценки тренда P_0 . Значимыми принимались оценки трендов, при которых $P_0 \leq 0,05$, т.е. гипотеза о наличии значимого тренда подтверждается с вероятностью $100(1 - P_0) \geq 95$ %. Статистические оценки трендов, представленных на рис.9, сведены в табл.3.

Результаты расчетов, представленные на рис.9 и в табл.3, подтверждают факт реального снижения ветро-волновой активности в прибрежной зоне СЗЧ во второй половине XX в. Они также показывают, что погрешности пересчитанных рядов могут превышать погрешности, вызванные заменой флюгеров на анемометры, поэтому представляется целесообразным использовать для оценки климатических изменений режима ветра длинные фактические ряды измерений ветра.

Несмотря на то, что длина некоторых рядов достигает 100 лет, с целью унификации статистического анализа и сравнимости трендов, при расчетах в основном использовались ряды продолжительностью 80 – 90 лет, хотя аналогичные расчеты производились и для полных рядов. Для рассматриваемой совокупности исходных данных значимыми по критериям Фишера и Стьюдента на уровне вероятности 0,05 и менее оказались линейные тренды подавляющего большинства станций. Как следует из табл.4, уровень их значимости составляет $> 99,99$ % (при $R^2 > 0,11$ $P_0 < 0,0001$). При расчете линейных трендов использовались исходные ряды среднегодовых и среднемесячных значений, без предварительного сглаживания скользящими фильтрами. Каждый расчет сопровождался тестом на сериальную коррелированность ряда с помощью критерия Дурбина-Ватсона D_0 , который предполагает отсутствие таковой при D_0 от 1,51 до 2,96 [10]. Таким образом, угловые коэффициенты трендов среднегодовой скорости ветра T_2 изменялись от $-0,008$ до $-0,028$ м/с-год, а общее уменьшение величин годовой скорости (Δ_2 – разность между последним и первым значениями тренда) за 80 – 90-летний период изменялось от $-0,7$ (Евпатория) до $-2,3$ м/с (Очаков). По отношению к соответствующим среднемноголетним нормам скорости ветра большей части рассматриваемых станций уменьшение скорости составило порядка 50 %.

Понижение средней скорости ветра отмечается во все сезоны года, причем на большей части станций наиболее интенсивно оно происходит в зимний сезон (T_3, Δ_3). Подробно сезонные изменения угловых коэффициентов линейных трендов скорости ветра показаны на рис.10 для рядов продолжительностью до 90 лет и для 30-летнего периода 1975 – 2005 гг. По данным полных рядов (рис.10, *a*) на большей части северо-западного побережья значимые отрицательные тренды свидетельствуют об уменьшении скорости ветра. Однако на западном берегу Крыма (Евпатория) с апреля по сентябрь тренды не значимы.

Чтобы оценить тенденцию изменения скорости ветра за последние 30 лет, когда в наибольшей мере проявились признаки глобального потепления (интенсивный рост температуры воздуха, повышение уровня Черного моря), по тем же станциям были рассчитаны тренды за период 1975 – 2005 гг. Из рис.10, *b* следует, что в этот период появляются положительные тренды

Т а б л и ц а 3. Характеристики линейных трендов среднегодовой скорости ветра (м/с/г) и повторяемости (%/г) ветра (≥ 10 м/с) и волнения ($\geq 7,5$ дм).

станция	период, гг.	параметр	T	R^2	t	F	P_0	Δ
Одесса, ветер, м/с	1945 – 2005	фактический	- 0,023	0,52	- 8,06	64,99	0,000	- 1,4
		пересчет	- 0,013	0,28	- 4,77	22,72	0,000	- 0,8
Очаков, ветер, м/с	1950 – 2005	фактический	- 0,021	0,36	- 5,48	30,05	0,000	- 1,2
		пересчет	- 0,011	0,16	- 3,24	10,50	0,002	- 0,6
Евпатория, ветер, м/с	1945 – 2005	фактический	- 0,020	0,42	- 6,58	43,23	0,000	- 1,2
		пересчет	- 0,014	0,31	- 5,13	26,36	0,000	- 0,8
Одесса, повторяемость, %	1955 – 2005	ветер	- 0,216	0,53	- 7,41	54,87	0,000	- 10,8
		волнение	- 0,155	0,11	- 2,51	6,28	0,016	- 8,2
Черноморское, повторяемость, %	1955 – 2005	ветер	- 0,158	0,34	- 4,97	24,68	0,000	- 7,9
		волнение	- 0,134	0,29	- 4,49	20,13	0,000	- 6,7
Херсонесский маяк, повторяемость, %	1955 – 2005	ветер	- 0,352	0,64	- 9,38	88,05	0,000	- 17,6
		волнение	- 1,008	0,66	- 9,58	91,68	0,000	- 50,4

Т а б л и ц а 4. Характеристики линейных трендов годовых и сезонных (зима, лето) величин средней скорости ветра на береговых станциях.

станция	период, гг.	T_{Σ} , м/с·год	R^2	P_0	D_0	Δ_{Σ} , м/с	T_{Σ} , м/с·г.	Δ_{Σ} , м/с	T_{Δ} , м/с·г.	Δ_{Δ} , м/с
Одесса	1915 – 2005	- 0,023	0,741	0,000	1,60	- 2,1	- 0,027	- 2,43	- 0,017	- 1,53
Очаков	1924 – 2005	- 0,028	0,727	0,000	1,75	- 2,3	- 0,034	- 2,75	- 0,025	- 2,03
Хорлы	1925 – 2005	- 0,026	0,703	0,000	1,71	- 2,1	- 0,023	- 1,84	- 0,027	- 2,16
Черноморское	1928 – 2005	- 0,014	0,271	0,000	1,56	- 1,1	- 0,019	- 1,46	- 0,011	- 0,85
Евпатория	1915 – 2005	- 0,008	0,138	0,000	1,60	- 0,7	- 0,014	- 1,26	- 0,002	- 0,18

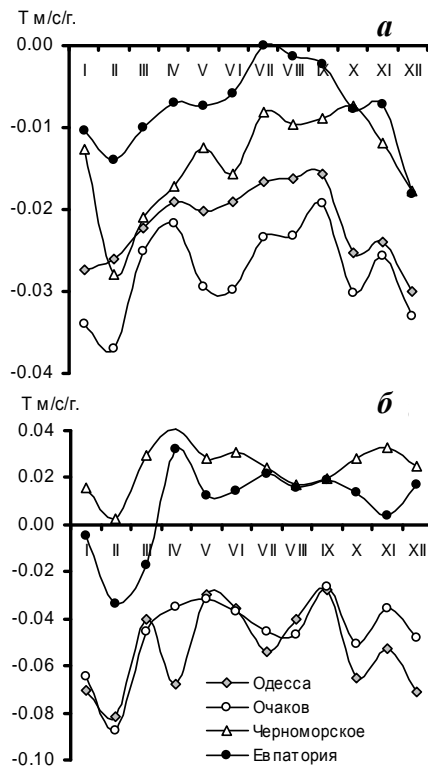


Рис. 10. Годовой ход трендов скорости ветра за периоды 1915 – 2005 гг. (а) и 1975 – 2005 гг. (б).

межгодовой изменчивости величин повторяемости градаций слабых и умеренных ветров. Анализ совокупности трендов показывает, что общими особенностями всех рассматриваемых участков береговой зоны СЗЧ являются значимые отрицательные тренды сильных (10 – 30 м/с) и умеренных (6 – 9 м/с) ветров, а также значимые положительные тренды слабых ветров (2 – 5 м/с). Что касается умеренных ветров (6 – 9 м/с), средняя повторяемость которых 20 – 30 % всех измерений, то на большинстве станций угловые коэффициенты трендов этой градации скорости имеют отрицательный знак (табл.5).

Общее уменьшение повторяемости штормовых ветров за последнее 60-летие изменяется от 6 (Очаков) до 12,6 % (Одесса). При этом существенно уменьшается и доля штормовых ветров ≥ 15 м/с, максимальная повторяемость которых отмечена в Евпатории (рис.12). Доля вет-

(Черноморское, Евпатория), т.е. существуют районы, где в последнее 30-летие происходит увеличение скорости ветра. Тем не менее, отрицательные тренды остальных станций (Одесса, Очаков) показывают, что в северной, континентальной части побережья сохраняется тенденция уменьшения скорости ветра.

Чтобы определить, за счет каких градаций скоростей происходит преимущественное ослабление ветра в том или ином районе побережья, выполнен анализ изменения во времени годовых величин *повторяемости* различных *градаций скорости ветра*, который проводился на основании массивов срочных наблюдений послевоенного (1945 – 2005 гг.) периода. В табл.5 представлены коэффициенты линейных трендов ($T\%/год$) и величины общего изменения повторяемости ($\Delta\%$) для периодов безветрия (0 – 1 м/с, по существу это повторяемость штилей), а также для градаций слабых (2 – 5 м/с), умеренных (6 – 9 м/с) и сильных (≥ 10 м/с) ветров, рассчитанных для 4 репрезентативных станций. В качестве примера на рис.11 представлены графики

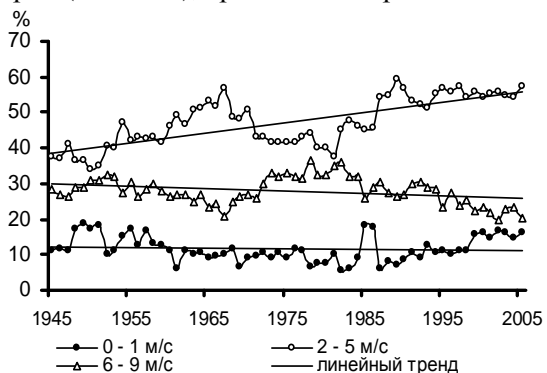


Рис. 11. Изменчивость годовых величин повторяемости различных градаций скорости ветра в районе Одессы.

Таблица 5. Характеристики линейных трендов годовых величин повторяемости (%) различных градаций скорости ветра (подчеркнуты тренды, значимые на уровне 95 %).

станция	период, гг.	$T_{0-1}, \%/г.$	$\Delta_{0-1}, \%$	$T_{2-5}, \%/г.$	$\Delta_{2-5}, \%$	$T_{6-9}, \%/г.$	$\Delta_{6-9}, \%$	$T_{10-30}, \%/г.$	$\Delta_{10-30}, \%$
Одесса	1945 – 2005	-0,023	-1,4	0,294	17,6	-0,059	-3,5	-0,210	-12,6
Очаков	1950 – 2005	0,064	3,5	0,228	12,5	-0,224	-12,3	-0,101	-6,1
Хорлы	1948 – 2005	0,256	14,6	0,182	10,4	-0,259	-14,8	-0,138	-8,3
Черноморское	1948 – 2005	-0,058	-3,3	0,192	11,0	0,030	1,7	-0,165	-10,0
Евпатория	1945 – 2005	-0,116	-7,0	0,317	19,0	-0,023	-1,4	-0,176	-10,6

ров скоростью ≥ 10 м/с в отдельные годы изменяется от 5 до 25 % суммарной повторяемости всех случаев наблюдений над ветром. Важной особенностью межгодовых изменений штормовых ветров на большей части станций является усиление повторяемости ветров ≥ 10 м/с в период 60 – 70-х гг. XX в., которые приводили к значительным материальным ущербам (особенно в Крыму) и даже к человеческим жертвам. Это связано с активизацией в этот период циклонических процессов, которые всегда сопровождаются усилением ветра, выпадением атмосферных осадков и понижением температуры воздуха.

Из вышеизложенного можно сделать вывод: наибольший вклад в общее ослабление средней скорости ветра вносит уменьшение повторяемости умеренных и сильных ветров на всем северо-западном побережье при значительном увеличении повторяемости слабых (2 – 5 м/с) ветров, за счет которого происходит уменьшение повторяемости периодов безветрия (штилей).

Сильные ветры. На протяжении всего побережья СЗЧ сильные ветры наблюдаются ежегодно и во все сезоны. Однако, как было показано, наиболее интенсивные и продолжительные усиления ветра отмечаются в холодную часть года с октября по март. Реже всего сильные ветры отмечаются в летние месяцы. Для оценки сезонной изменчивости ветров, не искаженных условиями береговой зоны, повторяемость штормовых ветров (10 – 30 м/с) по направлениям в различные месяцы года была рассчитана для центра СЗЧ (рис.1) на основании вышеупомянутого 40-летнего цифрового массива атмосферного давления и расчетного ветра над морем. С октября по март в этой части моря преобладают северо-восточные штормы, повторяемость которых достигает 4 – 6 % всех рассматриваемых случаев (рис.13). До мая ветры скоростью более 10 м/с могут действовать от любого направления и только в летний период ветры такой силы возможны, в основном, от северной четверти горизонта.

В любом районе моря и прибрежной зоны возможны сильные ветры любых направлений. Тем не менее, в каждом из районов побережья выявляются свои преобладающие направления

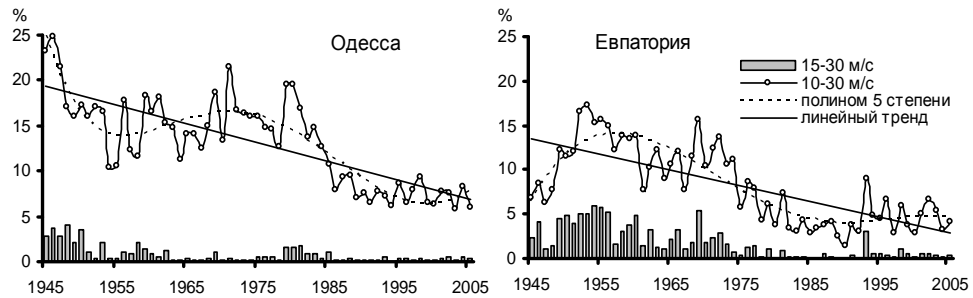


Рис. 1.2. Изменчивость годовых величин повторяемости сильных (≥ 10 м/с) ветров на береговых станциях Одесса и Евпатория.

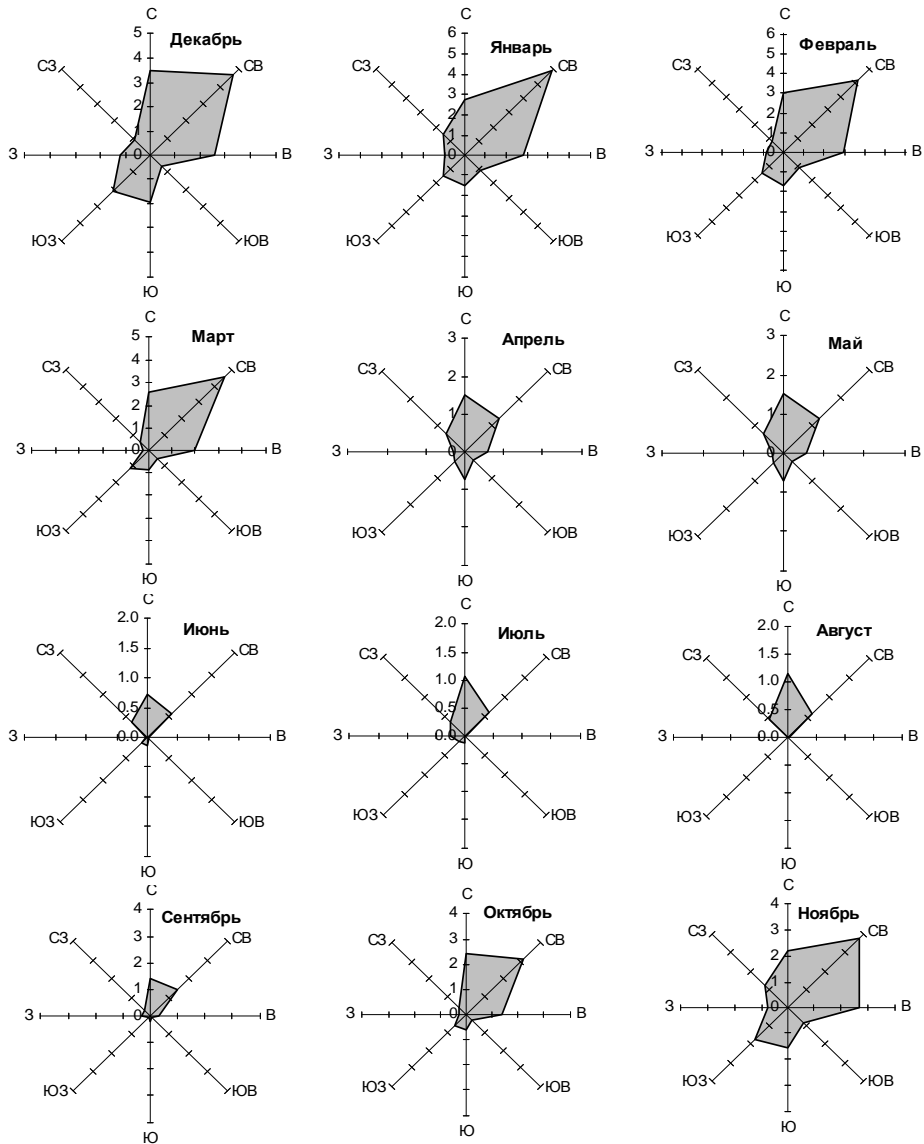


Рис. 1.3. Среднемесячные розы повторяемости (%) штормовых ветров (10 – 30 м/с) в центре северо-западной части Черного моря.

сильных ветров. На рис.14 отдельно представлены розы повторяемости штормового ветра 10 – 30 м/с. Практически все розы ветров СЗЧ показывают преобладающую повторяемость штормовых ветров северной половины горизонта (до 2,8 – 3,8 %) и восточных (1,3 %) румбов. Определяющим фактором ветровых условий над Черным морем является структура барического поля. Усиление скорости ветра над морем и побережьем обусловлено чаще всего циклонической деятельностью. В Черном море и, в частности, у его северо-западного побережья выделяются своими разрушительными последствиями осенние циклоны, которые случаются один раз в 7 – 10 лет и отличаются от обычных циклонов. Их особенность состоит в том, что они проходят над бассейном в период осеннего похолодания, когда некоторое время сохраняется относительно высокая температура воды.

К числу таких феноменов можно отнести жестокий шторм 14 – 16 ноября 1992 г., который нанес большой материальный ущерб, повредил нефтегазодобывающие платформы в СЗЧ, разрушил бетонные боны и размыл часть пляжей в Одессе и в Крыму. Давление в центре циклона за короткий период упало на 14,7 гПа, что способствовало развитию сильного ветра на его периферии в северо-западной и центральной частях Черного моря [5]. В СЗЧ максимальной силы достигал ветер северного направления скоростью 25 – 30 м/с.

Подобный перепад давления при выходе южных циклонов был отмечен и 10 – 12 ноября 1981 г. В период этого шторма центр циклона в течение трех суток стационарировал над Одессой. На его южной периферии изобары и, соответственно, линии тока геострофического ветра были направлены от юго-западного побережья моря в сторону Крыма. Область с максимумом ветра располагалась над открытым районом западной части Черного моря. При максимальном для СЗЧ разгоне волн и продолжающемся в течение двух суток юго-западном ветре скоростью 22 – 24 м/с волнение у западного побережья Крыма было экстремальным. На волномерном посту Херсонесский маяк при скорости юго-западного ветра 30 м/с была отмечена максимальная за весь период наблюдений высота волны 7,3 м.

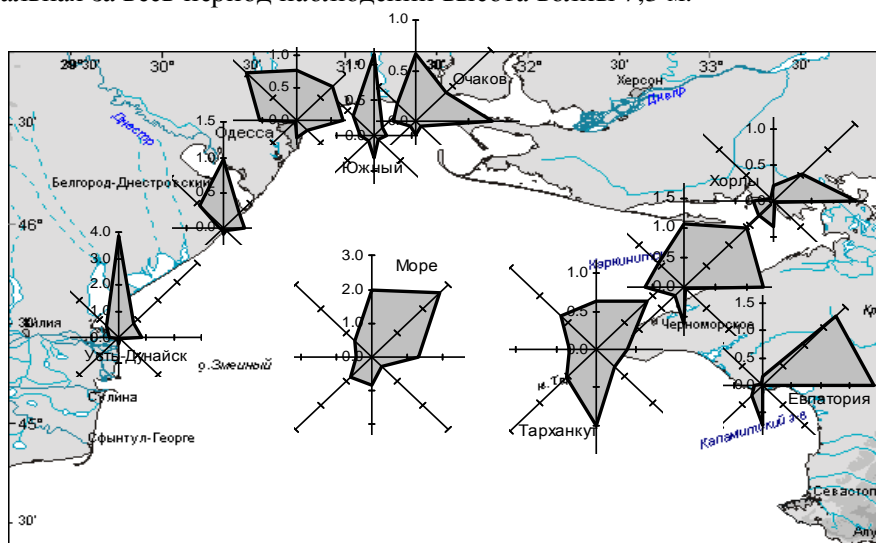


Рис. 14. Розы повторяемости (%) штормового ветра (10 – 30 м/с) на береговых станциях и в центре СЗЧ.

Наиболее опасными для северо-западного побережья являются ветры южного и юго-западного направлений. Как было показано выше, их повторяемость невелика, но они могут нанести максимальный ущерб. Такие синоптические ситуации наблюдались 4 декабря 1997 г. и 7 декабря 1981 г., когда высотное барическое поле было обусловлено ложбиной, направленной от Кольского п-ова через Центральную Европу, Балканы на восток Средиземного моря. В приземном барическом поле циклоны через Болгарию смещались на Босфор и далее, в передней части высотной ложбины, на страны Балтии. Здесь происходила его регенерация на арктическом фронте, вследствие чего и наблюдалось усиление ветра. При этом в п. Южном ветер южного направления достигал 12 – 17 м/с, в Одессе и Очакове 10 – 15 м/с, а в открытой части 15 – 20 м/с.

Для расчета максимальных скоростей ветра малой обеспеченности (средней скорости в срок наблюдения) использовалась методика Анапольской-Гандина [11], которая позволяет по номограмме с билогарифмической шкалой аппроксимировать распределение Вейбула-Гудрича в виде прямой и определить значения скорости ветра, возможной один раз в заданное число лет. Согласно [11] для расчета наибольших скоростей ветра, возможных один раз в n лет, с достаточной степенью точности можно использовать ряды регулярных наблюдений длительностью не менее 15 – 20 лет. В данном случае использовались ряды продолжительностью 45 – 60 лет. С помощью номограмм, подобных опубликованным в [11], по кривым распределения и

Т а б л и ц а 5. Скорость ветра (м/с), возможная один раз в n лет.

район	1 год	5 лет	10 лет	20 лет	50 лет	100 лет
море	27	31	33	35	38	40
Одесса	24	28	30	31	33	35
Очаков	22	26	28	30	32	34
Хорлы	24	29	31	34	37	39
Черноморское	26	32	34	35	39	40
Евпатория	27	32	34	36	39	41

их экстраполированным частям были определены значения скорости ветра, возможной один раз в n лет, которые представлены в табл.5. При сравнении этих результатов расче-

тов с аналогичными данными, опубликованными ранее, оказалось, что, несмотря на существенное общее уменьшение скорости ветра за последние полвека, экстремальные расчетные величины скоростей изменились мало.

Выводы. Результаты анализа долговременных изменений параметров ветрового режима северо-западной части Черного моря свидетельствуют об уменьшении скорости ветра во второй половине XX в.

Для всех сезонов года по данным метеорологических станций выявлены статистически значимые отрицательные тренды межгодовых изменений средней скорости ветра. Наиболее интенсивно снижение скорости ветра происходит в зимние месяцы.

Отрицательные тенденции средней скорости ветра сохраняются при устранении климатологической неоднородности рядов, т.е. при пересчете данных наблюдений по флюгеру в анемометрическую скорость ветра. Годовые величины повторяемости штормового волнения на береговых станциях,

методика наблюдения за которым не связана с измерением ветра, также характеризуются отрицательными трендами.

Общее ослабление средней скорости ветра сопровождается уменьшением повторяемости умеренных (6 – 9 м/с) и сильных (≥ 10 м/с) ветров при значительном увеличении повторяемости слабых (2 – 5 м/с) ветров.

На фоне общего снижения скорости ветра особо выделяется район северо-западного Крыма (Евпатория, Черноморское), где в последнее 30-летие, напротив, происходит увеличение скорости ветра.

Несмотря на общее уменьшение средней скорости ветра, в периоды редких, но жестоких штормов скорость ветра над северо-западной частью Черного моря ежегодно может превышать 20 – 25 м/с. Один раз в 5 лет возможны ураганы со скоростью ветра, превышающей 30 м/с, а один раз в столетие скорости ветра могут превышать 40 м/с.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Справочник по климату Черного моря.*– М.: Гидрометеиздат, –1974.– 405 с.
2. *Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т.IV. Черное море. Вып.1.* Гидрометеорологические условия.– С.-Пб.: Гидрометеиздат, 1991.– 430 с.
3. *Климат Украины / Под ред. В.М.Липинского, В.А.Дячука, В.Н.Бабиченко.*– Киев: Изд-во Раевского, 2003.– 343 с.
4. *Мещерская А.В., Еремин В.В., Баранова А.А., Майстрова В.В.* Изменения скорости ветра на севере России во второй половине XX века по приземным и аэрологическим данным // *Метеорология и гидрология.*– 2006.– № 9.– С.46-58.
5. *Репетин Л.Н., Белокопытов В.Н., Липченко М.М.* Ветры и волнение в прибрежной зоне юго-западной части Крыма // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.*– Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика.– 2003.– вып.9.– С.13-28.
6. *Иванов В.А., Репетин Л.Н., Мальченко Ю.А.* Климатические изменения гидрометеорологических и гидрохимических условий прибрежной зоны Ялты / *Препринт.*– Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2005.– 164 с.
7. *Горячкин Ю.Н., Иванов В.А., Репетин Л.Н.* Гидрометеорологические условия Феодосийского залива / *Препринт.*– Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2004.– 74 с.
8. *Белокопытов В.Н.* Применение геоинформационной системы «Гидрометеорология и гидрохимия Черного и Азовского морей» для комплексного анализа океанографических съемок // *Системы контроля окружающей среды.*– Севастополь: МГИ НАНУ, 2002.– С.200-204.
9. *Руководство по морским гидрологическим прогнозам.*– С.-Пб.: Гидрометеиздат, 1994.– 525 с.
10. *Durbin J.* Testing for serial correlation in least-squares regression when some of the regressors are lagged dependent variables // *Econometrica.*– 1970.– 38.– P.410-421.
11. *Анапольская Л.Е.* Режим скоростей ветра на территории СССР.– Л.: Гидрометеиздат, 1961.– 200 с.

Материал поступил в редакцию 15.05.2008 г.