УДК 551.584.2

**Режим, аномалии и многолетняя изменчивость ветро-волновых условий Севастопольского региона**

*В. Н. Маслова1, к. г. н., В. А. Наумова1,2, к. г. н., В.П. Евстигнеев1,2, к. ф.-м. н.*

*1ФГБНУ «Институт природно-технических систем»*

*2Севастопольский центр по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды*

Дана оценка многолетней изменчивости режимно-климатических и аномальных характеристик ветро-волновых условий Севастопольского региона: средние месячные скорость ветра и высота волн; месячный и годовой максимумы скорости и высоты волн; повторяемость различных градаций скорости ветра и высоты волн по направлениям; повторяемость высот волн и скоростей ветра, достигших критерия неблагоприятного и опасного гидрометеорологических явлений. Выделены периоды устойчивых положительных (1954 – 1983 гг.) и отрицательных (1984 – 2018 гг.) величин аномалий среднемесячных (максимальных) высот волн во все сезоны и месяцы по данным наблюдений на станции МГ Херсонесский маяк.

*Ключевые слова:* региональный климат,повторяемость штормов, периодическая изменчивость, волноопасные направления, штормовая активность, юго-запад Крыма, побережье Черного моря.

Севастопольский регион характеризуется разнообразием форм рельефа, ландшафтов, морфологии береговой линии и, как следствие, мезо- и микроклиматическими особенностями ветро-волнового режима. Несмотря на то, что северо-запад Черного моря традиционно относят к районам активной штормовой активности [1], конфигурация берега и значительная глубина моря у побережья Севастополя создают благоприятные условия для деформации и экранирования волн у мысов при подходе к берегу. Тем не менее, в условиях меняющегося климата Севастопольский регион подвержен изменению частоты экстремальных штормов, таких, например, как шторм 11 ноября 2007 г., которые приводят не только к тяжелым экономическим, но и экологическим последствиям. Ветровые условия Севастополя формируются под влиянием синоптических процессов над Азово-Черноморским бассейном, бризовой циркуляции, а так же физико-географических особенностей региона. Крымские горы создают препятствие для воздушных масс и, тем самым, генерируют сложные системы циркуляции, а также способствуют развитию локальных (катабатических и периодических) ветров в Севастопольском регионе.

Работы, посвященные исследованию ветро-волнового режима открытой части Черного моря, в настоящее время проводятся с использованием численных гидродинамических моделей (WAM [2], SWAN [3 – 6], модель «узконаправленного» спектра [7]) на основе заранее спрогнозированных или полученных из реанализа полей ветра. Перенесение результатов расчетов, получаемых для открытой части морей, на прибрежную часть является проблематичным, в связи с недостаточным пространственным, либо временным разрешением используемых полей данных и зависимостью условий возникновения или деформации волн в прибрежной зоне от локальных условий. В этих районах высоты должны быть меньше вследствие деформации и обрушения волн в прибрежной зоне. Характеристики ветрового волнения в прибрежной зоне могут быть определены по данным наблюдений на существующей сети гидрометеорологических станций. Однако в отличие от ветра, информация с описанием режима волнения по данным морских прибрежных наблюдений в справочных изданиях до сих пор не публиковалась.

Режиму волнения отдельных районов юго-западной части Крыма посвящен ряд научных публикаций, но анализ проводился в рамках решения конкретных задач [8, 9]. Авторами указанных работ, кроме современных данных наблюдений, также привлекались исторические массивы по пунктам наблюдения, которые на сегодняшний день являются закрытыми. Это позволило им, в частности, описать особенности ветро-волнового режима таких бухт, как Камышовая и Балаклавская (Севастопольского района). Штормовой ветро-волновой режим по Крымскому побережью Черного моря был представлен в работе [9], в которой авторами была также сделана попытка не только изучить режимные характеристики, но и обсудить межгодовую изменчивость данных наблюдения за ветром и волнением. При этом в большом количестве публикаций, посвященных ветро-волновым условиям Крымского побережья, отмечается ярко выраженная неоднородность использованных методик анализа волнения. А именно авторы используют одновременно такие характеристики ветрового волнения, как высота волн (м) и состояние моря в баллах [10], применяют различные критерии определения штормовых высот, выбирают непоказательные, с точки зрения волнения, станции и посты. Все это вносит элемент неоднозначности в интерпретацию получаемых результатов и может привести к достаточно неожиданным выводам (например, несоответствие периодов активизации штормовой деятельности для разных районов Черного моря [9, 11]).

Поэтому настоящая работа посвящена исследованию режимно-климатических и аномальных характеристик ветро-волновых параметров Севастопольского региона по данным станционных наблюдений на Павловском мысе (МГ Севастополь) и мысе Херсонес (МГ Херсонесский маяк), а также их многолетней изменчивости. Данная цель представляет несомненный интерес для деятельности, связанной с долгосрочным планированием, созданием и поддержанием прибрежной инфраструктуры, сохранением морских экосистем и рациональным использованием ресурсов прибрежной зоны в плане предотвращения ущерба в связи с неблагоприятными и опасными ветро-волновыми аномалиями.

Для анализа режима и изменчивости ветро-волновых условий Севастопольского региона использовались данные гидрометеорологических наблюдений на станциях МГ Херсонесский маяк и МГ Севастополь, продолжительность которых превышает 100 лет (1915 – 2018 гг. по волнению и 1865 – 2018 гг. по ветру). Однако до 1945 г. в массивах имеется значительное количество пропусков, обусловленных Гражданской и Великой Отечественной войнами. В послевоенном периоде перерывы в наблюдениях отсутствуют. Кроме того, примерно до второй половины ХХ в. ряды характеризуется неоднородностью в связи с изменением методов и способов наблюдения. С 1954 г. наблюдения за волнением моря на МГ Херсонесский маяк проводят полуинструментальным методом с использованием волномера-перспектометра, а современные данные характеристик ветра получают с помощью модификаций анеморумбометров с 1961 г. на МГ Севастополь и с 1974 года на МГ Херсонесский маяк.

*Массив данных наблюдений за ветром* по пунктам МГ Севастополь и МГ Херсонесский маяк включает в себя следующие характеристики: направление ветра в румбах (или градусах), среднюю скорость ветра в м/с (сутки или срок наблюдения), максимальную скорость ветра (сутки или срок наблюдения), максимальную скорость ветра за 3 часа (с 1984 г.). Следует отметить, что за весь период менялись методики и способы наблюдения за характеристиками ветра, местоположение пункта, сроки наблюдения и высота установки ветро-измерительных приборов, и каждое из вышеперечисленных изменений может стать причиной нарушения однородности ряда данных. Проверка на однородность данных наблюдений МГ Севастополь за скоростью ветра была проведена авторами ранее в работе [12] за период 1954 – 2017 гг. Видимых причин для нарушения однородности ряда не выявлено.

*Массив данных характеристик волнения* имеется по пункту МГ Херсонесский маяк и включает в себя такие параметры, как тип волнения и состояние моря в баллах, а, начиная с 1954 г. – высоту волн в метрах, тип волнения, период и длину волн. МГ Херсонесский маяк является одним из немногих пунктов Азово-Черноморского побережья с наиболее продолжительными (более 60 лет) сохранившимися рядами полуинструментальных наблюдений за характеристиками волнения, по другим пунктам наблюдения проводятся визуально, с указанием высоты волн в метрах. Проведенные ранее в работе [12] сравнения данных инструментальных и многолетних полуинструментальных измерений за период 1954 – 2018 гг. позволили сделать вывод о возможности отнесения ряда данных наблюдений за волнением на МГ Херсонесский маяк к однородным и целесообразности его использования для построения режимных функций распределения высот волн.

Для расчета ветро-волнового режима по данным наблюдений морских гидрометеорологических станций Севастопольского региона были использованы стандартные методы с учетом рекомендаций [10; 13]. Климатические нормы представлены за действующий в настоящее время стандартный 30-летний период (1961 – 1990 гг.) согласно рекомендациям Всемирной метеорологической организации [14], кроме того даны современные характеристики ветро-волнового режима за период 1977 – 2018 гг. и в целом за надежный период 1954 – 2018 гг.

Кроме базовых режимно-климатических характеристик ветро-волновых параметров, приведена характеристика повторяемости скоростей ветра и высот волн, достигших уровня неблагоприятного гидрометеорологического явления (НГЯ). Критерием, определяющим НГЯ, для морских отраслей принята средняя скорость ветра 12 м/с и более, ветер скоростью 25 м/с и более относится к опасному явлению (ОЯ). С учетом безопасности маломерного флота критерием НГЯ для Черного моря принята высота волн 1,3 м, а высоты волн от 6,0 м являются критерием ОЯ.

**Средние климатические характеристики ветра**

Полученные средние и экстремальные (максимальные и минимальные, с указанием года событий) скорости ветра по месяцам и за год за периоды 1961 – 1990 и 1977 – 2018 гг. приведены в *табл. 1* по МГ Севастополь и *табл. 2* по МГ Херсонесский маяк.

Среднегодовая скорость ветра по МГ Севастополь за период 1977 – 2018 гг. составляет 3,4 м/с, при этом в течение года среднемесячные скорости ветра колеблются незначительно от минимальных 3,1 м/с в мае до максимальных 3,8 м/с в феврале и декабре. В отдельные годы среднегодовая скорость ветра может достигать 4,1 м/с (1956 г.) либо не превышать 2,9 м/с (1996 г.). Максимальная среднемесячная скорость ветра 6,2 м/с наблюдалась в январе 1959 г., минимальная, 1,7 м/с, зафиксирована в ноябре 2000 г.

Таблица 1

**Средняя месячная скорость ветра (м/с) по данным МГ Севастополь**

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| *Среднемесячная скорость ветра* | *I* | *II* | *III* | *IV* | *V* | *VI* | *VII* | *VIII* | *IX* | *X* | *XI* | *XII* | *Год* |
| 1977-2018 гг. | 3,7 | 3,8 | 3,7 | 3,3 | 3,1 | 3,2 | 3,3 | 3,2 | 3,2 | 3,3 | 3,5 | 3,8 | 3,4 |
| 1961-1990 гг. | 4,1 | 4,0 | 3,9 | 3,6 | 3,3 | 3,5 | 3,5 | 3,5 | 3,5 | 3,5 | 3,8 | 4,2 | 3,7 |
| Максимальная | 6,2 | 6,0 | 4,9 | 4,7 | 4,4 | 4,2 | 4,6 | 4,3 | 4,3 | 4,5 | 5,2 | 5,6 | 4,1 |
| Год максимальной | 1959 | 1959 | 1956 | 1956 | 1974 | 1958 | 1978 | 1977 | 1959 | 1973 | 1955 | 1973 | 1956 |
| Минимальная | 2,2 | 2,1 | 2,3 | 2,4 | 2,3 | 2,2 | 2,6 | 2,5 | 2,4 | 2,4 | 1,7 | 2,7 | 2,9 |
| Год минимальной | 1996 | 1984 | 1985 | 1996 | 1979 | 1999 | 1988 | 1992 | 1994 | 1993 | 2000 | 1990 | 1996 |

Среднегодовая скорость ветра по МГ Херсонесский маяк составляет 4,9 м/с и в течение года среднемесячные скорости ветра колеблются незначительно от минимальных 3,8 м/с в июне до максимальных 6,2 м/с в январе. В отдельные годы среднегодовая скорость ветра может достигать 5,5 м/с (1979 г.), либо не превышать 3,6 м/с (2009 г.). Максимальная среднемесячная скорость ветра, 7,4 м/с, наблюдалась в январе 1969 г., в этом же году были отмечены максимальные среднемесячные скорости ветра в феврале – 7,3 м/с. Минимальные среднемесячные скорости зафиксированы в основном после 2000 г. и составляют 2,5 м/с в августе 2005 г.

Как видно из табл. 1 и 2, в целом в Севастопольском регионе для всех месяцев произошло уменьшение средних скоростей ветра в современный климатический период (1977 – 2018 гг.) по сравнению со стандартным (1961 – 1990 гг.).

Таблица 2

**Средняя месячная скорость ветра (м/с) по данным МГ Херсонесский маяк**

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Среднемесячная скорость ветра | I | II | III | IV | V | VI | VII | VIII | IX | X | XI | XII | Год |
| 1977-2018 гг. | 6,2 | 5,8 | 5,5 | 4,7 | 3,9 | 3,8 | 3,9 | 4,1 | 4,4 | 5,0 | 5,5 | 6,1 | 4,9 |
| 1961-1990 гг. | 6,6 | 6,2 | 5,8 | 5,0 | 4,3 | 4,1 | 4,2 | 4,3 | 4,7 | 5,2 | 5,8 | 6,6 | 5,2 |
| Максимальная | 7,4 | 7,3 | 6,3 | 6,0 | 5,2 | 5,3 | 5,7 | 5,3 | 5,8 | 6,6 | 7,0 | 6,9 | 5,5 |
| Год максимальной | 1969 | 1969 | 1956 | 1975 | 1966 | 1958 | 1978 | 1960 | 1973 | 1976 | 1981 | 1979 | 1979 |
| Минимальная | 2,8 | 3,4 | 3,2 | 2,9 | 2,9 | 2,9 | 2,7 | 2,5 | 2,8 | 3,2 | 3,3 | 3,2 | 3,6 |
| Год минимальной | 1999 | 2000 | 1985 | 2002 | 2002 | 2008 | 2001 | 2005 | 2006 | 2008 | 2010 | 1998 | 2009 |

Результаты расчета повторяемости градаций скорости ветра по данным наблюдений за период 1977 – 2018 гг. приведены в *табл. 3* для МГ Севастополь и *табл. 4* для МГ Херсонесский маяк. Наибольшую повторяемость имеют ветры, не превышающие 5 м/с (81,3 % по МГ Севастополь и 63 % по МГ Херсонесский маяк). В холодное полугодие их повторяемость уменьшается до 75,1 % (февраль) на МГ Севастополь и до 47,3 % (январь) на МГ Херсонесский маяк, а в теплое – увеличивается и достигает 85,5 % (май) на МГ Севастополь и 77,0 % (июнь) на МГ Херсонесский маяк.

Критерия НГЯ (12 м/с и более) скорость ветра достигает крайне редко, в среднем за год повторяемость таких скоростей составляет 0,34 % на МГ Севастополь и 3,2 % на МГ Херсонесский маяк, при этом в холодное полугодие их повторяемость увеличивается (с максимальным значением 0,8 % в январе и феврале на МГ Севастополь и 8,2 %, в январе на МГ Херсонесский маяк), а в теплое уменьшается (в июле до 0,03 % на МГ Севастополь и 0,8 % на МГ Херсонесский маяк). В отдельные годы повторяемость неблагоприятных скоростей ветра может значительно отличаться от средних многолетних значений и достигать, в январе 1959 г., и достигать, например, в январе 4,8 % (1959 г.) на МГ Севастополь и 10,4% (1969 г.) на МГ Херсонесский маяк.

*Таблица 3*

**Повторяемость (%) различных градаций скорости ветра по данным МГ Севастополь за 1977 – 2018 гг.**

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Скорость,  м/с | I | II | III | IV | V | VI | VII | VIII | IX | X | XI | XII | Год |
| 0 – 5 | 76,4 | 75,1 | 77,7 | 81,9 | 85,5 | 85,1 | 85,4 | 84,6 | 84,8 | 83,5 | 80,3 | 75,4 | 81,3 |
| 6 – 11 | 22,7 | 24,0 | 21,8 | 17,8 | 14,4 | 14,8 | 14,5 | 15,3 | 15,0 | 16,3 | 19,1 | 24,0 | 18,3 |
| 12 – 14 | 0,8 | 0,8 | 0,5 | 0,3 | 0,1 | 0,1 | 0,03 | 0,1 | 0,2 | 0,2 | 0,4 | 0,6 | 0,3 |
| 15 – 19 | 0,1 | 0,1 | 0,03 | 0,01 | 0,03 | – | – | – | 0,01 | 0,03 | 0,20 | 0,04 | 0,04 |

*Таблица 4*

**Повторяемость (%) различных градаций скорости ветра по данным МГ Херсонесский маяк за 1977 – 2018 гг.**

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Скорость, м/с | I | II | III | IV | V | VI | VII | VIII | IX | X | XI | XII | Год |
| 0 – 5 | 47,3 | 51,5 | 55,0 | 64,6 | 75,6 | 77,0 | 76,4 | 74,3 | 68,6 | 61,1 | 54,8 | 49,0 | 63,0 |
| 6 – 11 | 44,3 | 41,7 | 39,6 | 32,3 | 22,8 | 21,8 | 22,7 | 24,6 | 29,5 | 35,2 | 39,8 | 43,1 | 33,1 |
| 12 – 14 | 6,7 | 5,3 | 4,4 | 2,5 | 1,4 | 1,0 | 0,8 | 1,0 | 1,6 | 3,2 | 4,2 | 6,8 | 3,2 |
| 15 – 19 | 1,5 | 1,4 | 1,0 | 0,5 | 0,3 | 0,2 | 0,1 | 0,2 | 0,3 | 0,6 | 1,2 | 1,2 | 0,7 |

Рассмотрим для разных сезонов повторяемость по направлениям скоростей ветра, достигших критерия НГЯ, приведенную на рис. 1 для МГ Севастополь и рис. 2 для МГ Херсонесский маяк.

На МГ Севастополь наибольшая повторяемость в течение всего года характерна для неблагоприятного ветра южного, северо-западного и северного направлений с максимумом зимой (весной для южного направления). Ветры восточного, юго-восточного направлений практически не достигают критерия неблагоприятного явления. На МГ Херсонесский маяк наибольшую повторяемость имеют неблагоприятные скорости ветра северо-восточного направления, они наблюдаются в течение всего года, достигая максимальной повторяемости зимой – 1,95 %.



*Рис. 1.* **Повторяемость (%) по направлениям скоростей ветра 12 м/с и более в разные сезоны по данным МГ Севастополь за 1977 – 2018 гг.**

Продолжительные штормовые ветры северо-восточного направления в Севастопольском регионе формируются под влиянием обширных по площади и устойчивых во времени антициклональных полей и выходов южных циклонов, такая барическая система обладает большой устойчивостью, и продолжительность штормовых ветров северо-восточного направления может превышать 5 – 6 суток [12].



*Рис. 2.* **Повторяемость (%) по направлениям скоростей ветра 12 м/с и более в разные сезоны по данным МГ Херсонесский маяк за 1977 – 2018 гг.**

Тем не менее, как показано на *рис. 3*, в порту Севастополя восточное направление ветра является преобладающим (с максимальной повторяемостью в августе и сентябре, 30 – 34 %). Это направление доминирует в теплое полугодие, начиная с мая и включая ноябрь, а с декабря ему на смену приходит ветер северо-восточного направления, который сохраняет свои позиции в течение зимы. Кроме того, была рассчитана повторяемость штилей, которая в среднем составляет 6,3 %, наблюдаются они в течение всего года.

Как видно из *рис. 4* на МГ Херсонесский маяк преобладающим является северо-восточное направление ветра, которое достигает максимума в декабре – 26,1 %. Оно доминирует во все месяцы, кроме апреля, мая и июня. В эти месяцы повторяемость южного направления увеличивается и составляет 19,0 – 23,7 %, а повторяемость северо-восточного направления уменьшается до 14,5 – 15,5 %. Также получено, что повторяемость штилей у мыса Херсонес в течение года колеблется от 2,0 % в декабре до 6,1 % в мае и июне.

Как видно из рис. 3 и 4, розы ветров по МГ Херсонесский маяк и МГ Севастополь отличаются, несмотря на близость расположения этих пунктов. Это связано с тем, что существенный вклад в характеристики ветра вносит физико-географическое положение пункта наблюдения. По этой причине ветры восточного направления для МГ Севастополь на Павловском мысе являются одними из преобладающих (21,6 %), тогда как на МГ Херсонесский маяк на мысе Херсонес они наблюдаются крайне редко (5,6 %).



*Рис. 3.* **Повторяемость (%) по месяцам и сезонам направлений ветра по данным наблюдений МГ Севастополь за 1954 – 2018 гг.**



*Рис. 4.* **Повторяемость (%) по месяцам и сезонам направлений ветра по данным наблюдений МГ Херсонесский маяк за 1977 – 2018 гг.**

**Средние климатические характеристики ветрового волнения**

В отличие от пункта МГ Севастополь, расположенного в бухте, на МГ Херсонесский маяк имеются благоприятные условия для развития значительных высот волн: это глубоководные участки прибрежной зоны (10 м), объект наблюдения «открытое море», сектор свободного подхода волн к месту наблюдения 270º и значительная длина разгона от волноопасных направлений (ЮВ-З-СВ). Данные по станции МГ Херсонесский маяк являются репрезентативными и наиболее полно отражают ветро-волновой режим и его многолетнюю изменчивость не только для Севастопольского региона, но и всего юго-западного и западного побережья Крымского полуострова [12].

Основными типами волнения на мысе Херсонес, как показано в *табл. 5*, являются зыбь с ветровым и ветровое, в среднем за год их повторяемость составляет 45,8 % и 38,7 %, соответственно. Вклад других типов незначительный.

Таблица 5

**Повторяемость (%) типов волнения по МГ Херсонесский маяк за 1977 – 2018 гг.**

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Тип | I | II | III | IV | V | VI | VI | VII | IX | X | XI | XII | Год |
| Ветровое волнение | | | | | | | | | | | | | |
| ВВ | 31,3 | 31,5 | 34,8 | 39,3 | 42,9 | 41,9 | 43,3 | 46 | 42 | 37,2 | 32,3 | 30,7 | 38,7 |
| Зыбь | | | | | | | | | | | | | |
| ЗБ | 10,4 | 9,9 | 9,7 | 10,8 | 12,4 | 12 | 11,4 | 10,7 | 12,4 | 13,6 | 13 | 10,6 | 11,4 |
| Мертвая зыбь | | | | | | | | | | | | | |
| МЗ | 2 | 2,6 | 3,8 | 4,3 | 5,6 | 5,7 | 4,6 | 4,2 | 3,8 | 3,9 | 3,1 | 2,2 | 4 |
| Ветровое волнение / зыбь | | | | | | | | | | | | | |
| ВЗ | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,03 | 0,1 | 0,1 | 0,2 | 0,2 | 0,1 | 0,1 | - | 0,1 |
| Зыбь двух разных направлений | | | | | | | | | | | | | |
| ЗЗ | - | - | - | - | - | 0,1 | - | - | - | 0,1 | - | - | 0,01 |
| Зыбь / ветровое волнение | | | | | | | | | | | | | |
| ЗВ | 56,2 | 55,8 | 51,6 | 45,5 | 39 | 40,2 | 40,6 | 38,9 | 41,7 | 45,1 | 51,4 | 56,6 | 45,8 |

Полученные средние и экстремальные высоты волн по месяцам и за год приведены в *табл. 6*. По данным МГ Херсонесский маяк среднегодовая высота волн за исследуемый период (1977 – 2018 гг.) составляет 0,8 м, в течение года среднемесячные высоты волн изменяются незначительно, от 0,6 до 1,2 м, с максимумом в холодное полугодие. В отдельные годы экстремальные значения среднемесячной высоты волн могут составлять 2,1 м (январь 1976 г.) в холодное полугодие и 0,3 м в теплое полугодие.

Получено, что в течение года волны высотой 0,5 м и менее по данным МГ Херсонесский маякнаблюдаются в 50,4 % случаях, при этом повторяемость таких волн в теплое полугодие возрастает до 59 – 67 %, а в холодное уменьшается до 28 – 33 %.

Таблица 6

**Средние месячные высоты волн (м) по МГ Херсонесский маяк за 1977 – 2018 гг.**

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Высота волн (м) | I | II | III | IV | V | VI | VII | VIII | IX | X | XI | XII | Год |
| Средняя месячная | 1,2 | 1,2 | 0,9 | 0,7 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,7 | 0,8 | 1,0 | 1,2 | 0,8 |
| Максимальная  средняя месячная | 2,1 | 1,9 | 1,4 | 1,2 | 1,1 | 0,9 | 1,1 | 1,2 | 1,3 | 1,4 | 1,7 | 1,9 | 1,2 |
| Год | 1976 | 1970 | 1956 | 1965 | 1966 | 1969 | 1969 | 1960 | 1959 | 1958 | 1981 | 1978 | 1970 |
| Минимальная  средняя месячная | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 0,4 | 0,4 | 0,6 | 0,5 |
| Год | 1996 | 1984 | 1991 | 1996 | 1993 | 1997 | 1994 | 1992 | 1994 | 1987 | 2000 | 1994 | 1996 |

Критерия НГЯ (1,3 м) высота волн у мыса Херсонес за исследуемый период достигала достаточно часто, в среднем за год повторяемость таких волн составляет 20 % с максимумом до 31% в январе и декабре, как видно из *рис. 5*. В теплое полугодие их повторяемость значительно уменьшается и составляет 8,2 % в мае и 21,7 % в октябре. В отдельные годы (1970 г., 1976 г.) средняя годовая повторяемость неблагоприятных высот волн составляла около 44 % с максимумом в январе / феврале, например, до 87 % в феврале 1970 г., как показано на рис. 5.



*Рис. 5*. **Повторяемость высоты волн 1,3 м и более по месяцам за 1977 – 2018 гг. и для примера в 1970 г.**

Наибольшую опасность для береговой инфраструктуры и мореплавания представляют волны, высота которых достигает критерия опасного явления – 6 м и более. Таких случаев за период наблюдения 1954-2018 гг. на МГ Херсонесский маяк было шесть. Характеристики случаев максимального волнения за период 1954 – 2018 гг. приведены в *табл. 7*, из которой видно, что высоты волн достигают критериев ОЯ при усилении ветра западной четверти. За исследуемый период максимальная высота волны, 7,3 м, была отмечена на мысе Херсонес 10 ноября 1981 г. и зафиксирована как абсолютный максимум в Азово-Черноморском регионе. В период развития этого шторма средняя скорость ветра юго-западного направления достигала 20 м/с.

Таблица 7

**Характеристики случаев максимального волнения по месяцам и в среднем за год по данным МГ Херсонесский маяк за 1954 – 2018 гг.** (обозначение типа волнения – согласно *табл. 5*)

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Месяц | Высо-та, м | Дата | Год | Тип волн. | Направление волны | Длина волны, м | Период волны, с | Направление  ветра | Ср.скорость ветра, м/с |
| I | 6 | 27 | 1964 | ЗВ | ЮЗ/ЮЗ | 146 | 9,4 | ЮЗ | 20 |
| II | 5,6 | 4 | 1970 | ЗВ | ЮЗ/З | 119 | 9,8 | ЗЮЗ | 10 |
| III | 6 | 3 | 1988 | ВВ | З | 148 | 13,5 | ЗЮЗ | 21 |
| IV | 5 | 3 | 1965 | ВВ | СЗ | 98 | 8,1 | СЗ | 20 |
| V | 5,5 | 24 | 1970 | ВВ | ЮЗ | 126 | 8,3 | ЮЗ | 16 |
| VI | 4 | 20 | 1971 | ЗВ | З/СЗ | 84 | 7,2 | СЗ | 14 |
| VII | 5,6 | 14 | 1969 | ВВ | З | 112 | 9,6 | З | 16 |
| VIII | 5,2 | 6 | 1972 | ЗВ | ЮЗ/ЮЗ | 116 | 8,5 | ЮЗ | 10 |
| IX | 5,6 | 20 | 1971 | ВВ | ЮЗ | 121 | 9,8 | ЗЮЗ | 18 |
| X | 5,6 | 28 | 1969 | ВВ | СЗ | 119 | 9,8 | СЗ | 22 |
| XI | 7,3 | 10 | 1981 | ЗВ | ЮЗ/ЮЗ | 138 | 13,7 | ЮЮЗ | 20 |
| XII | 5,6 | 18 | 1969 | ЗВ | ЮЗ/СЗ | 119 | 9,7 | ЗСЗ | 14 |
| Год | 7,3 | 10 | 1981 | ЗВ | ЮЗ/ЮЗ | 138 | 13,7 | ЮЮЗ | 20 |

Преобладающими направлениями волнения по данным наблюдений МГ Херсонесский маяк за период 1977 – 2018 гг. являются румбы северного, южного, юго-западного и северо-западного направлений. Повторяемость неблагоприятных ветра и волнения по направлениям существенно различаются между собой, как показано на *рис. 6*, что в значительной мере определяется типом волнения, которое только в 38,7 % случаев является ветровым (см. табл. 5). В связи с географическим положением мыса Херсонес максимальное развитие волны получают в случаях усиления ветров юго-западного направления, а при усилении ветров восточного направления развития волнения не происходит.



*Рис. 6.* **Повторяемость (%) высоты волн 1,3 м и более (слева) и скорости ветра 12 м/с и более (справа) по направлениям по данным МГ Херсонесский маяк**

**Многолетняя изменчивость характеристик ветра и волнения**

*Скорость ветра*

Для двух смежных 30-тилетних климатических периодов (1954 – 1983 и 1984 – 2017 гг.) по пунктам Севастопольского региона были рассчитаны средние многолетние величины скорости ветра, представленные в *табл. 8*. Такое разбиение на периоды позволяет отследить изменение ветровых условий в регионе во второй половине XX в. – начале XXI в.

В результате сравнения норм скорости ветра по двум смежным климатическим периодам были выявлены различия между среднемноголетними скоростями ветра, а именно уменьшение нормы скорости ветра, которое, тем не менее, является статистически незначимым. Однако эта тенденция подтверждается расчетом линейного тренда среднегодовой скорости ветра за период 1954 – 2017 гг. (см. табл. 8), который имеет отрицательный знак и является значимым. Значимость трендов устанавливалась на основе теста Манна-Кендалла на уровне 1%.

*Таблица 8*

**Среднемноголетние скорости ветра по пунктам наблюдения Севастопольского региона в смежные климатические периоды и значимые линейные тренды**

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| *Пункт наблюдения* | *Среднемноголетняя*  *скорость ветра* | | | *Линейный тренд*  *(м/с·10 лет) за период*  *1954-2017 гг.* |
| *1954-1983* | *1984-2017* | *разность* |
| МГ Севастополь | 3,8 | 3,1 | -0,7 | -0,19 |
| МГ Херсонесский маяк | 5,0 | 4,6 | -0,4 | -0,15 |

Уменьшение скорости ветра в Севастопольском регионе, скорее всего, является проявлением глобальных процессов, протекающих в климатической системе Земли. Нестационарность временных рядов, выражаемая в уменьшении скоростей ветра в Причерноморье и Приазовье за последние десятилетия, отмечена во многих работах [8, 11, 15, 16]. Было показано [17, 18], что повсеместное уменьшение скоростей ветра во второй половине XX в. характерно практически для всей территории России, а в более поздней работе [19] аналогичные тенденции были отмечены для всего Северного полушария. К возможным причинам авторы цитируемых работ отнесли естественные климатические изменения в режиме атмосферной циркуляции, с одной стороны, и увеличение защищенности метеоплощадок вследствие застройки и зарастания окрестностей, – с другой. Однако вопрос о вкладе каждого из этих факторов до сих пор остается открытым, как и вопрос о связи многолетней изменчивости характеристик ветра в Севастопольском регионе с крупномасштабными процессами в глобальной климатической системе Земли.

На *рис. 7* представлен многолетний ход скорости ветра по данным метеорологических станций МГ Херсонесский маяк и МГ Севастополь. На фоне отмеченного в целом для региона отрицательного тренда многолетний ход среднегодовой скорости ветра характеризуется межгодовым масштабом изменчивости с максимумом скорости ветра в 1969 г. (на МГ Херсонесский маяк), характерным для всего Азово-Черноморского региона [12].



*Рис. 7.* **Многолетний ход среднегодовой скорости ветра (м).** Черным цветом нанесена линия тренда, красным – линии кусочной регрессии

Заметной особенностью временного хода на рис. 7 является однократная смена тенденции скорости ветра, либо по величине, либо также и по знаку. В первом приближении модель такой смены может быть представлена в виде кусочной (сегментированной) линейной регрессии, заключающейся в построении локального регрессионного уравнения для двух связанных между собой сегментов с оценкой параметров посредством метода максимального правдоподобия [20]. Поскольку преследовалась цель качественного описания изменений, оценка значимости коэффициентов регрессии не проводилась.

Результат построения кусочной регрессии представлен на рис. 7 в виде красных сегментированных линий. Так, исследуемый период разделяется на два сегмента с точкой переключения в конце 70-х – начале 80-х гг. ХХ в. Первый сегмент связан с выраженным уменьшением скорости ветра, в то время как во втором сегменте прослеживается незначительная тенденция к увеличению ветровой характеристики.

*Высота волн*

На *рис. 8* показан график многолетнего хода средней за зимний период величины максимальной высоты волн по пункту МГ Херсонесский маяк. Как следует из рисунка, спектр изменчивости выбранной характеристики содержит низкочастотную компоненту.



*Рис. 8.* **Многолетний ход средней из максимальных высот волн за зимний сезон**

На *рис. 9* изображен многолетний ход высот волн по сезонам на МГ Херсонесский маяк, представленный в виде аномалий. Аномалии получены путем пересчета абсолютных значений высоты, нормированных на стандартное отклонение от средних значений. Такое представление позволяет анализировать изменчивость штормовой деятельности без учета абсолютных высот волн.



*Рис. 9.* **Многолетний ход аномалий среднемесячных высот волн для сезонов по данным МГ Херсонесский маяк**

Анализ многолетнего хода аномалий среднесезонных высот волн в течение более чем векового периода, позволяет сделать качественный вывод о наличии выраженной периодичности в изменении высот волн. В осенние и весенние сезоны периодический характер изменчивости максимальной высоты волн сохраняется, но ход аномалий несколько сглажен, что, по-видимому, связано с менее устойчивыми синоптическими процессами в переходные сезоны. Общей характеристикой многолетней изменчивости высоты волн в разные сезоны является чередование положительных и отрицательных аномалий междесятилетнего масштаба с точкой перехода, приходящейся на начало 80-х гг., в связи с чем было условно выделено два периода с сильной (1954 – 1983 гг. – положительная фаза) и слабой (1984 – 2013 гг. – отрицательная фаза) штормовой активностью. Ранее авторами статьи [21] была изучена многолетняя изменчивость аномалий максимальной высоты волн Азово-Черноморского региона, где также четко прослеживалось чередование периодов устойчивых положительных и отрицательных величин аномалий.

Высота волн в периоды положительных и отрицательных фаз ветро-волновых аномалий имеет выраженные различия по среднемноголетним значениям для всех месяцев, как показано на *рис. 10*. В холодное полугодие различие между аномалиями среднемесячной высоты волн в отрицательную и положительную фазы больше, чем в теплый период, что можно объяснить незначительной изменчивостью высоты волн в летний сезон.

При этом имеет место однозначное соответствие выделенных периодов с изменением повторяемости высоты волны 1,3 м и более, которая является критерием НГЯ для судов маломерного флота. На *рис. 11* представлена повторяемость направления таких волн, а также повторяемость ветра 12 м/с и более для положительной и отрицательной фаз ветро-волновых аномалий. Повторяемость высоты волн, достигшей НГЯ (рис. 11), как и среднемесячной высоты волн (рис. 10), при положительной фазе аномалий значительно выше, но при этом преобладающие направления ветра сохраняются в обеих фазах (*рис. 10б*).



*Рис. 10.* **Годовой ход среднемесячной высоты волн по данным МГ Херсонесский маяк за два периода: 1954 – 1983 гг., 1984 – 2018 гг.**



(*а*) (*б*)

*Рис. 11.* **Повторяемость высот волн 1,3 м и более (*а*) и ветра 12 м/с и более (*б*) по направлениям по данным МГ Херсонесский маяк за два периода: 1954 – 1983 гг. (красные столбики), 1984 – 2018 гг. (синие столбики)**

За период 1954 – 2018 гг. максимальная высота волны 7,3 м была отмечена на МГ Херсонесский маяк 10 ноября 1981 г. (зафиксирована как абсолютный максимум в Азово-Черноморском регионе). Волны, высоты которых достигают экстремальных значений, наблюдаются на данном пункте наблюдений редко, однако чаще чем в других пунктах Азово-Черноморского региона [12]. Наиболее часто штормы с высотой волн 6 м и более, т.е. достигающей критерия ОЯ, отмечались в 60-х – 70-х гг., т.е. в период положительной фазы ветро-волновых аномалий. Наибольшая повторяемость штормов в этот период также была отмечена во всем Азово-Черноморском регионе др. авторами [8, 22].

В завершении необходимо отметить следующее. Сравнение рис. 7 и рис. 8 позволяет сделать вывод, что по данным МГ Херсонесский маяк основная мода изменчивости характеристик ветровых волн в целом согласуется с изменениями ветрового режима в регионе, что и следовало бы ожидать исходя из очевидной причинно-следственной связи, однако установить однозначную связь не представляется возможным, чему есть объяснение. Ранее в работе [23] было указано, что климатические изменения в полях ветрового волнения происходят не столько за счет изменения среднеклиматических характеристик ветра, сколько по причине климатических изменений в частоте штормов, которые могут и не проявляться в среднемесячных параметрах. Характеристики волнения являются своеобразным штормовым параметром, «интегрирующим» величину скорости и продолжительность штормового ветра, устойчивость действия ветра вдоль волноопасных направлений и частоту таких событий. Это важное замечание, требующее проведения более тщательного анализа причины формирования ветро-волновых аномалий – крупномасштабных синоптических макропроцессов, изменение в повторяемости которых определяют региональные климатические изменения.

# Выводы

Анализ режима и изменчивости ветро-волновых условий Севастопольского региона был проведен с использованием стандартных методов анализа длительных (вековых), приведенных к однородным данных гидрометеорологических наблюдений по МГ Херсонесский маяк и МГ Севастополь и позволил сделать следующие выводы:

В целом по Севастопольскому региону за период 1954 – 2018 гг. преобладающим является северо-восточное направление ветра. В районе мыса Херсонес чаще всего отмечается направление волнения северного, южного, юго-западного и северо-западного румбов. Повторяемость преобладающих направлений ветра и волнения отличается, что в значительной мере определяется типом волнения, которое только в 38 % случаев является ветровым и в 45 % – смешанным (зыбь / ветровое). Конфигурация берега и значительная глубина моря на побережье Севастопольского региона создают благоприятные условия для деформации и экранирования волн у мысов при подходе к берегу.

Средняя годовая скорость ветра в Севастопольском регионе составляет 4,9 м/с на МГ Херсонесский маяк и 3,4 м/с на МГ Севастополь. В течение года среднемесячные скорости меняются незначительно. Наибольшую повторяемость имеют ветры, не превышающие 5 м/с – 81 % на МГ Севастополь и 63 % на МГ Херсонесский маяк.

Средняя годовая высота волн на пункте наблюдения в районе мыса Херсонес составляет 0,8 м. Повторяемость волн высотой 0,5 м и ниже на в среднем за год составляет 50%. Среднемесячные высоты волн колеблются в диапазоне от 0,6 м в теплое полугодие до 1,2 м в холодное полугодие, а в отдельные годы могут достигать 2,1 м (январь 1976г.).

За период 1954 – 2018 гг. максимальная высота волны 7,3 м была отмечена на МГ Херсонесский маяк 10 ноября 1981 г. (зафиксирована как абсолютный максимум в Азово-Черноморском регионе). Критерия опасного явления (ОЯ) 6 м и более высота волн достигала за исследуемый период шесть раз.

Многолетний ход аномалий среднемесячных (максимальных) высот волн во все сезоны и месяцы по МГ Херсонесский маяк, который является репрезентативным пунктом наблюдения не только для Севастопольского региона, но и всего юго-западного и западного побережья Крымского полуострова, содержит чередование периодов устойчивых положительных и отрицательных величин аномалий. Характеристики волнения являются своеобразным штормовым параметром, «интегрирующим» величину скорости и продолжительность штормового ветра, устойчивость действия ветра вдоль волноопасных направлений и частоту таких событий. Поэтому анализ закономерности изменения волнового климата должен опираться на исследовании крупномасштабных синоптических процессов, обусловливающих штормовую погоду в Азово-Черноморском регионе.

*Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ и г. Севастополя № 18-45-920068 р\_а.*

**Литература**

1. Атлас волнения и ветра Черного моря / Под ред. Г.В. Ржеплинского. – Л.: Гидрометеоиздат, 1969. – 111 с.
2. Атлас экстремального ветрового волнения Черного моря / В.В. Ефимов, О.И. Комаровская. – Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика», 2009. – 60 с.
3. Полонский А.Б., Фомин В.В., Гармашов А.В. Характеристики ветрового волнения Черного моря // Доклады НАН Украины, 2011. № 8. – С. 108-112.
4. Arkhipkin V.S., Gippius F.N., Koltermann K.P., Surkova G.V. Wind waves in the Black Sea: results of a hindcast study // Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 2014. V.14. –Pр. 2883-2897.
5. Akpinar A., van Vledder G.Ph., Kömürcü M.I., Özger M. Evaluation of the numerical wave model (SWAN) for wave simulation in the Black Sea // Continental Shelf Research, 2012. V. 50-51. – Pр. 80-99. – DOI: 10.1016/j.csr.2012.09.012.
6. Akpinar A., Bingölbali B., van Vledder G.Ph. Long-term analysis of wave power potential in the Black Sea, based on 31-year SWAN simulations // Ocean Engineering, 2017. V.130. – Pр. 482-497.
7. Кабатченко И.М. Моделирование ветрового волнения. Численные расчеты для исследования климата и проектирования гидротехнических сооружений: Автореферат дисс. ... д.г.н. – М., 2006. – 281 с.
8. Репетин Л.Н., Белокопытов Л.Н., Липченко А.И. Ветры и волнение в прибрежной зоне юго-западной части Крыма / Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа, 2003. Вып. 9. – С. 13-28.
9. 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. – Севастополь: МГИ НАНУ, 2009 – С. 56-69.
10. Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Ч. 1. – Л.: Гидрометеоиздат, 1984. Вып. 9. – 312 c.
11. Гидрометеорологические условия морей Украины. Том II Черное море / Ю.П. Ильин, Л.Н. Репетин, В.Н. Белокопытов и др. – Севастополь, 2012. – 420 с.
12. Ветро-волновые условия прибрежной зоны Азово-Черноморского региона / В.П. Евстигнеев, В.А. Наумова, Е.Н. Воскресенская, М.П. Евстигнеем, Е.П. Любарец – Севастополь: ИПТС, 2017. – 320 с.
13. Руководство по расчету элементов гидрологического режима в прибрежной зоне морей и в устьях рек при инженерных изысканиях / Под ред. С.С. Байдина, Б.Х. Глуховского. – М.: Гидрометеоиздат, 1973. – 535 с.
14. WMO: Standardised Verification System for Long-Range Forecasts. In: Manual on the GDPFS (WMO №485), 2006. V.I.
15. Репетин Л.Н., Белокопытов В.Н. Режим ветра северо-западной части Черного моря и его климатические изменения / Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа, 2008. Вып. 17. – С. 225-243.
16. Луц Н.В. Многолетняя изменчивость скорости ветра в Восточном Приазовье // Метеорология и гидрология, 2001. №2. – С. 98-101.
17. Мещерская А.В., Еремин В.В., Баранова А.А., Майстрова В.В. Изменение скорости ветра на севере России во второй половине XX века по приземным и аэрологическим данным // Метеорология и гидрология, 2006. № 9. – С. 46-58.
18. Баранова А.А., Голод М.П., Мещерская А.В. Изменение градуированных скоростей ветра на территории России во второй половине ХХ века // Труды ГГО, 2007. Вып. 556. – С. 116-138.
19. Vautard R. et al. Northern Hemisphere atmospheric stilling partly attributed to an increase in surface roughness // Nat.Geosci., 2010. V.3. – Pр. 756-761.
20. Fong Y., Huang Y., Gilbert P.B., Permar S.R. Chngpt: threshold regression model estimation and inference // BMCBioinformatics, 2017. 18:454. – DOI: 10.1186/s12859-017-1863-x.
21. Воскресенская Е.Н., Наумова В.А., Евстигнеев М.П., Евстигнеев В.П. Классификация синоптических процессов и штормов в Азово-Черноморском бассейне // Сб. научн. тр. УкрНИГМИ, 2009. Вып. 258. – С. 189-200.
22. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. IV. Черное море. – СПб: Гидрометиздат, 1991. – С. 354-366.
23. Gulev S.K., Hasse L. North Atlantic wind waves and wind stress fields from voluntary observing data // J. Phys. Oceanogr., 1998. 28. – Pр. 1107-1130.

*Сведения об авторах:*

Маслова Вероника Николаевна, к. г. н., в.н.с. ИПТС, директор ФГБНУ «Институт природно-технических систем» (ИПТС). 299011, г. Севастополь, ул. Ленина, 28. Тел./факс: (8692) 54-44-10, e-mail: veronika\_maslova@mail.ru

Наумова Валентина Анатольевна, к. г. н., в.н.с. ИПТС, директор Севастопольского центра по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Севастопольский ЦГМС). 299011, г. Севастополь, ул. Советская, 61, п/я 260. Тел.: (8692) 54-36-81, e-mail: vnaumova51@mail.ru

Евстигнеев Владислав Павлович, к. ф.-м. н., в.н.с. ИПТС, замначальника Севастопольского ЦГМС. Тел.: (8692) 54-36-81, e-mail: vald\_e@rambler.ru