

# СТАТИСТИКА ВЕТРА И ВОЛН В СЕВЕРНОЙ АТЛАНТИКЕ ПО ДАННЫМ БУЙКОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

*З.К. Абузяров*

*Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации  
abusiar@metcom.ru*

## Введение

Характерной особенностью ветро-волновых процессов в океане является их значительная пространственно-временная изменчивость, обусловленная наложением и взаимодействием большого числа факторов, формирующих особенности ветро-волнового режима в том или ином районе Мирового океана, в том числе и в Северной Атлантике. Изучению изменчивости этих процессов в океане посвящено большое количество работ [1–4, 6–10]. Тем не менее многие вопросы еще остаются открытыми.

При исследовании статистической структуры ветро-волновых процессов обычно выделяют три временных интервала изменчивости: интервал квазистационарной изменчивости, охватывающий порядка 20–60 минут; интервал синоптической изменчивости, охватывающий период от нескольких суток до месяца (внутримесячная изменчивость); годовой ход и интервал изменчивости от года до нескольких десятков лет (климатическая изменчивость). Наименее изучена статистика синоптической изменчивости, хотя эта составляющая является преобладающей в энергетическом спектре и играет важную роль в формировании штормов и так называемых «окон погоды».

В [8] впервые было предложено функцию распределения высот волн на интервале синоптической изменчивости  $\Phi(h)$  аппроксимировать в виде произведения функции распределения высот волн в квазистационарной выборке на плотность распределения средних высот волн в данном шторме

$$\Phi(h) = \int_0^{h_m} G(h; \bar{h}) f(\bar{h}) d\bar{h},$$

где  $G(h; \bar{h})$  – функция распределения в квазистационарной выборке;  $f(\bar{h})$  – плотность распределения средних высот волн;  $h_m$  – максимальная высота волн в шторме.

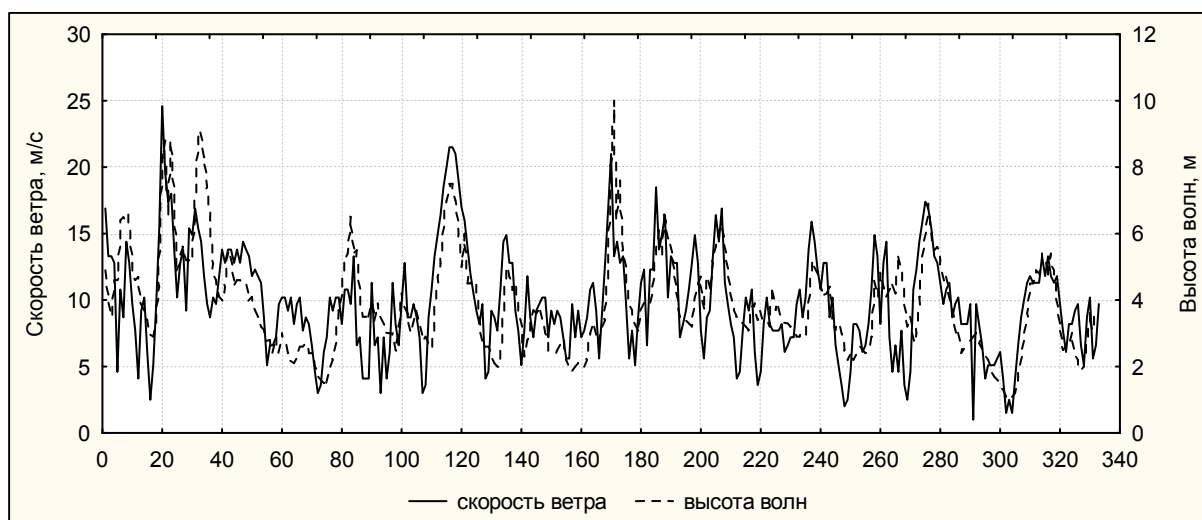
Было показано, что распределение индивидуальных высот волн достаточно хорошо аппроксимируется распределением Вейбулла. Проверка функции распределения на

отдельных штормах не выявила полного соответствия между теоретическими и эмпирическими результатами.

В последнее время резко возрос и качественно изменился поток информации о ветровом волнении благодаря внедрению таких наблюдательных технологий, как спутниковая альтиметрия и стационарные автоматические буи. Накопленные к настоящему времени данные буйковых измерений позволяют более детально проанализировать изменчивость ветра и высот волн во времени и пространстве и выявить общие закономерности динамики волновых процессов непосредственно по данным наблюдений.

В настоящей статье на основе буйковых наблюдений за ветром и высотой волн исследуются некоторые вопросы, связанные с изучением статистики этих характеристик на интервале синоптической изменчивости. Статистический анализ был выполнен на материалах, охватывающих месяцы наиболее активного волнообразования (октябрь–март), когда вероятность опасного ветрового волнения достаточно высока. Зимой шторма сохраняются в течение продолжительного времени (до 200 ч) и отличаются большой интенсивностью. В период действия штормов высота волн нередко достигает опасных для судоходства значений (8 м и более).

Наиболее наглядно синоптическую изменчивость ветра и высоты волн можно проследить по графикам временного хода скорости ветра и высоты волн, зафиксированных в синоптические сроки. Пример такого графика, охватывающего период с 15.01.2013 г. по 31.03.2013 г. для буя 62095 в северо-восточной части Северной Атлантики, показан на рис. 1.



**Рис. 1. Временной ход скорости ветра и высоты волн с января по март 2013 года в районе буя 62095.**

На графике отчетливо видно, что временные ряды скорости ветра и высоты волн представляют собой типичный циклический процесс поочередной смены штормов и «окон погоды», периоды которых колеблются от нескольких суток до месяца. Анализ функций корреляционной и спектральной плотности для рядов ветра и высоты волн показал наличие периодов временной изменчивости 3–5 и 13–15 суток. Изменчивость, определяемая периодом около 4 суток, по-видимому, является результатом прохождения барических образований (циклонов, ложбин и т.д.). Второй характерный период изменчивости около 14 суток, по-видимому, соответствует наиболее вероятному периоду существования определенного типа циркуляции атмосферы (естественно-синоптический период).

Смена типа циркуляции, т.е. формирование иного типа поля ветра над определенным районом Северной Атлантики приводит к изменениям штормовых (погодных) условий, росту или ослаблению скорости ветра, и как следствие, к увеличению или уменьшению высоты волны, изменению интенсивности шторма. Скорее всего, именно эти факторы и определяют основные закономерности и особенности изменчивости высоты волн синоптического масштаба. Знание этих закономерностей весьма важно для понимания структуры временной изменчивости высоты волн и обоснования приоритета временного осреднения при оценке заблаговременности прогноза синоптического масштаба.

На рис.1 также видно, что изменчивость высоты волн тесно связана с изменчивостью ветра, которая в свою очередь определяется особенностями атмосферных процессов, обуславливающих большую пространственно-временную неоднородность ветра и волн над Северной Атлантикой. По этой причине временные ряды высот волн и ветра можно рассматривать как случайный стохастический процесс, что делает возможным применение к его анализу методов математической статистики и теории вероятностей. Настоящее исследование преследует целью получить количественные оценки изменчивости ветра и волн во времени и по площади. Такие оценки необходимы как для изучения режима ветра и волн в Северной Атлантике, так и для разработки вероятностного метода прогноза аномальных высот волн с заблаговременностью синоптического масштаба.

### **Использованные материалы и их обработка**

Основным источником информации о ветре и волнении явились данные измерений автоматических заякоренных буев, размещенных по акватории Северной Атлантики. Данные с этих буев собираются с помощью геостационарных метеорологических спутников, а сводки распространяются по ГСТ в международном коде SHIP (FM13-IX). Координаты буев

меняются со временем незначительно. Данные о ветре и высоте волн выбирались за четыре синоптических срока: 00, 06, 12 и 18 ч ВСВ. В настоящее время в Северной Атлантике функционирует несколько десятков таких буев. Схема расположения выбранных буев показана на рис. 2, а координаты этих буев приведены в табл. 1

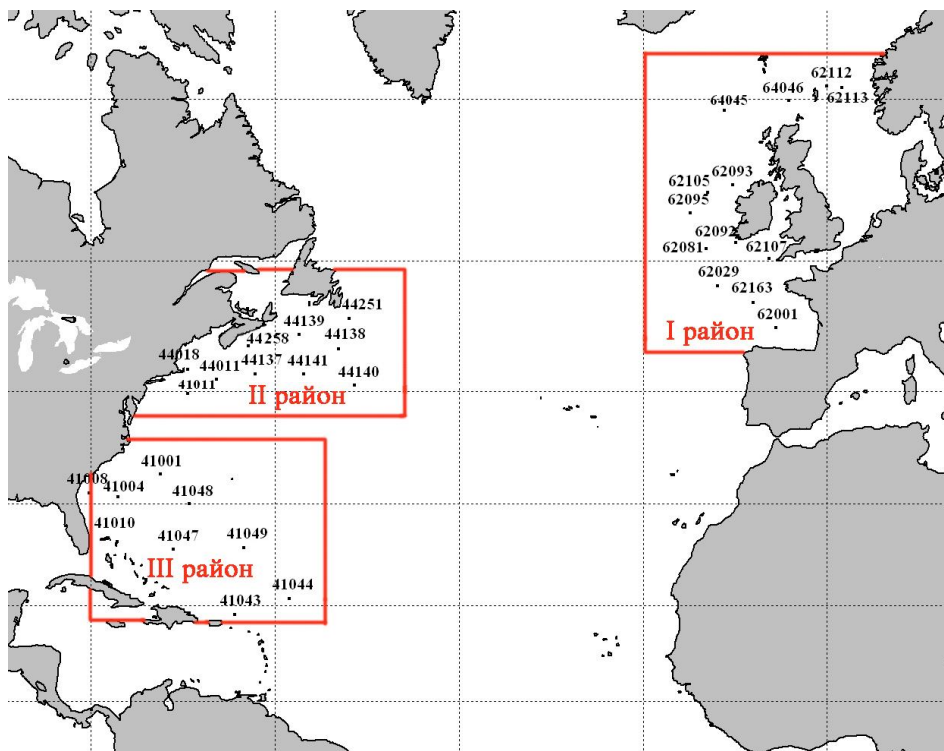


Рис. 2. Схема расположения заякоренных буев в Северной Атлантике.

Таблица 1

Координаты выбранных стационарных буев в Северной Атлантике

Юго-западный сектор			Северо-восточный сектор		
Номера буев	широта	долгота	Номера буев	широта	долгота
44140	42,86	-51,47	64046	60,70	-4,50
44139	44,24	-57,10	64045	59,10	-11,40
44138	44,25	-53,63	62095	53,06	-15,92
44137	42,23	-62,02	62105	55,40	-12,20
44018	42,13	-69,93	62108	53,30	-19,30
44011	41,11	-66,60	62090	53,20	-11,20
41001	34,56	-72,63	62092	51,22	-10,55
41048	31,95	-69,50	62081	51,00	-13,30
41010	28,91	-78,47	62107	50,10	-6,10
41049	29,50	-63,00	62029	48,70	-12,40
41047	27,47	-71,49	62163	47,50	-8,50
41043	21,06	-64,97	62001	45,20	-5,00

Примечание: Знак минус означает, что долгота западная

Для каждого выбранного буя формировались временные ряды срочных наблюдений за ветром и высотами волн за четыре холодных периода года: 2009/2010, 2010/2011, 2011/2012 и 2012/2013 гг., включающие месяцы с октября по март.

По сформированным рядам наблюдений осуществлялся расчет и анализ основных статистических характеристик изменчивости скорости ветра и высоты волн: среднего арифметического и среднего квадратичного отклонений, экстремальных значений, коэффициентов асимметрии и эксцесса и оценивалась их динамика. Наряду с моментными характеристиками по временным рядам высот волн определялись максимальные высоты волн в штормах, средняя и непрерывная продолжительность штормов, а также повторяемость (вероятность) высот волн выше заданных пороговых значений. Все расчеты были выполнены в системе «STATISTICA» [5].

Статистические характеристики рассчитывались для каждого буя в отдельности и затем осреднялись в пределах заранее выбранных квазиоднородных районов. Выбор таких районов был осуществлен на основе анализа ковариационных матриц, объединяющих группы буюв западного и восточного секторов Северной Атлантики. Показателем однородности служили значимые коэффициенты корреляции между соседними буями. Те буи, для которых этот показатель превышал 0,6, относились к соответствующему району.

Таким образом было выделено три района (рис. 2). Первый район включал буи, расположенные в северо-восточной части Северной Атлантики, второй район – буи, расположенные вокруг о. Ньюфаундленд, и третий район – буи, расположенные в юго-западной части Северной Атлантики южнее 40° с.ш. Первый и второй районы отличаются высокой повторяемостью штормов, обусловленных активной циклонической деятельностью. Известно, что второй район является местом частого образования циклонов на фронтальной зоне, идущей параллельно береговой линии. Молодые фронтальные циклоны, углубляясь, перемещаются к северо-востоку и там обуславливают жестокие зимние штормы. Третий район характеризуется специфическими особенностями ветро-волнового режима: меньшей интенсивностью ветрового волнения, чем первый и второй районы, и преобладанием волн зыби, приходящей из северных районов. Обобщенная статистика скорости ветра и высоты волн, осредненная по трем районам, за четыре холодных периода представлена в табл. 2. Обозначения в таблице:  $W$  – скорость ветра, м/с;  $h$  – высота волны, м;  $\bar{\Delta}$  – среднее значение;  $\sigma$  – среднеквадратичное отклонение;  $m$  – максимальное значение скорости ветра и высоты волны.

Анализ результатов (табл. 2) иллюстрирует существенную неоднородность статистических показателей по акватории Северной Атлантики, и это естественно. Северная Атлантика отличается огромной протяженностью, что обуславливает большое разнообразие физико-географических и климатических условий. Конкретная синоптическая ситуация и соответствующие ей поля ветра и волнения в том или ином районе зависят от взаимного расположения и интенсивности проходящих циклонов и антициклонов.

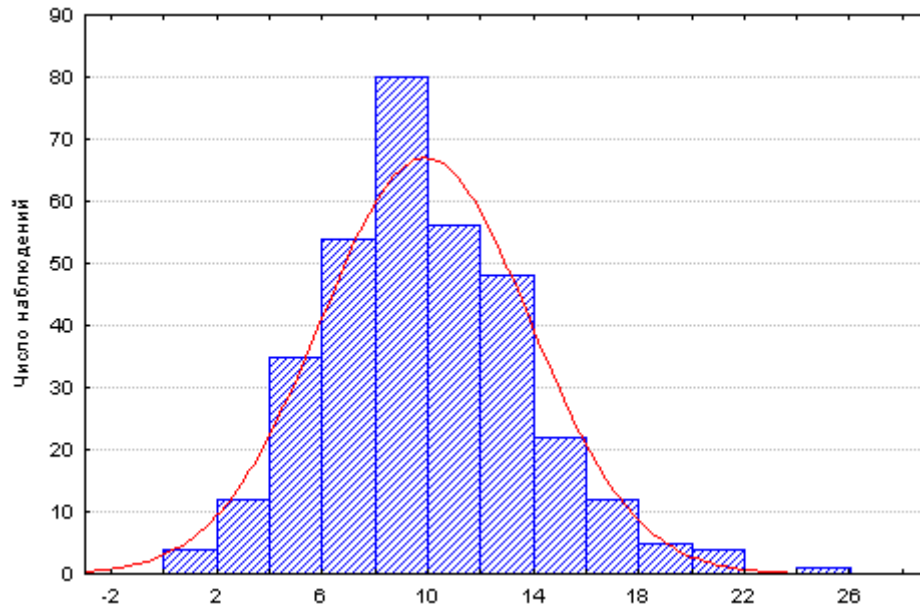
Наибольшей пространственно-временной изменчивостью ветра и высоты волн отличаются умеренные широты Северной Атлантики, где происходят достаточно быстрые и резкие смены погоды, обусловленные активной циклонической деятельностью, особенно при прохождении атмосферных фронтов. Наибольшие средние месячные скорости ветра характерны для декабря–февраля первого и второго районов (от 8,6 до 9,2 м/с), а наименьшие – для третьего района (от 7,1 до 7,4 м/с). Наибольшая скорость ветра за весь рассматриваемый период в первом районе составила 42 м/с, во втором районе – 24 м/с и в третьем районе – 25 м/с.

В ходе среднеквадратичного отклонения  $\sigma$  средней месячной скорости ветра проявляется сезонная изменчивость. Наибольшие значения  $\sigma$  характерны для зимних месяцев (декабрь, январь, февраль) первого и второго районов ( $\sigma = 3,0 - 4,5$  м/с.), для ближайших к ним осенних (октябрь–ноябрь) и весеннего (март) месяцев значения  $\sigma$  близки между собой. В третьем районе значения  $\sigma$  изменялись от 1,8 до 3,8 м/с.

Наблюдающиеся различия в характере хода средней скорости ветра и  $\sigma$  в различных районах обуславливаются преобладающим влиянием либо исландского минимума, либо азорского максимума. Зимой интенсивность атмосферной циркуляции особенно велика севернее  $40^\circ$  с.ш., так как исландский минимум в это время года наиболее ярко выражен. Ряды распределения скорости ветра достаточно близко соответствуют нормальному закону. Пример гистограммы эмпирического распределения скорости ветра для ряда, объединяющего все месяцы, с наложенной теоретической кривой нормального распределения показан на рис. 3.

Что касается высоты волн, то анализ временного хода высоты волн от срока к сроку указывает на большие различия в темпах роста и затухания волн под действием ветра. Отмечены случаи, когда при определенных условиях, благоприятствующих росту волн, их высота за короткое время может увеличиться на несколько метров. Однако причиной такого резкого увеличения высоты волн может быть не только ветер, например, резонансное взаимодействие волн разных систем, распространяющихся под небольшими углами друг к

другу и с близкими фазовыми скоростями. Возможно, именно в этих условиях и возникают так называемые «волны-убийцы». Диапазон изменчивости высоты волн и скорости их роста значительно больше в зимние (декабрь–февраль), чем в другие месяцы (октябрь, ноябрь, март).



**Рис. 3. Гистограмма эмпирического распределения скоростей ветра и ее аппроксимация теоретической кривой нормального закона распределения.**

За рассматриваемый период среднемесячная высота волн по годам менялась незначительно: в первом районе от 3,4 до 3,8 м, во втором – от 2,8 до 3,2 м и в третьем – от 2,0 до 2,4 м. Максимальная за месяц высота волн в первом районе составила 14,7 м, во втором – 11,1 м и в третьем – 10,9 м. Всего за период было зафиксировано 105 случаев, когда высота волн превышала 8 м, и 45 случаев – 10 м. Наибольшие высоты волн были зафиксированы в декабре 2009 г. (16,9 м), в феврале 2013 г. (14,9 м), в феврале 2011 г. (14,7 м) и в декабре 2011 г. (14,1 м).

Для сравнения в табл. 3 приведены характеристики высот волн по данным наблюдений на станции J в Северной Атлантике (59° с.ш., 19° з.д.) в весенне-летний и осенне-зимний месяцы 1953, 1954 и 1959 гг. [1]. Обозначения в таблице:  $\bar{h}$  – средняя высота волны, м;  $h_{1/3}$  – значительная высота волны, м;  $h_m$  – максимальная высота волны, м;  $|h_m|$  – абсолютная максимальная высота волны, м;  $P(h > 10\text{ м})$  – вероятность (повторяемость) волн с высотой более 10 м, м;  $\tau_m$  – максимальный период волн, с;  $\tau_{1/3}$  – значительный период волн, с.

**Характеристики волн по данным наблюдений на станции J в весенне-летний и осенне-зимний сезоны 1953, 1954 и 1959 гг.**

Сезон	Число наблюдений	Высота волн, м				Период волн, с		
		Средние значения			$ h_m $	$P(h > 10\text{м}),$ %	$\tau_m$	$\tau_{1/3}$
		$\bar{h}$	$h_{1/3}$	$h_m$				
Март–август	1976	1,73	2,75	5,1	18,0	3,2 (63)	15	7,0
Сентябрь–февраль	1642	2,55	4,05	7,5	19,2	23,9 (392)	15,0	9,0

Примечание: В скобках приведено число случаев. В шести случаях в сентябре–феврале высота волн превышала 18 м.

Из табл. 3 видно, что статистические характеристики высоты волн в холодную часть года (сентябрь–февраль), когда наблюдается активная циклоническая деятельность над Северной Атлантикой, примерно в полтора раза больше, чем в теплую часть (март–август). Высота волн 10 м и более в холодную часть года наблюдалась за эти годы 392 раза, что составило 23,9 % из общего числа наблюдений (3618 случаев). Шесть раз высота волн превышала 18 м, наибольшая измеренная высота составила 19,2 м. В то же время в теплую часть года высота волн 10 м и более наблюдалась в 63 случаях, или 3,2 % от общего числа случаев. При этом большая часть случаев приходится на весенние месяцы (март–апрель), когда вероятность появления сильных штормов еще достаточно высока. По данным табл. 2 видно, что осенне-зимние месяцы 1953, 1954 и 1959 гг. отличались большей суровостью, чем рассматриваемые в статье холодные сезоны 2009/2013 гг. (табл. 2).

Средняя месячная высота волн по данным буев может различаться в 2–2,5 раза для отдельных районов Северной Атлантики и для различных лет. Так, например, в феврале 2011 года в первом районе средняя высота волны составила 5,1 м, а в 2012 г. в третьем районе она составила всего 1,9 м. Экстремальные высоты волн в отдельные годы и в различных районах могут различаться в 3–4 раза. Так, в феврале 2011 г. в первом районе высота волны составила 14,7 м, а в октябре 2010 г. в третьем районе – всего 3,7 м, в то время как в октябре 2012 г. в этом же районе наблюдалась волна высотой 11 м.

Временной ход высоты волн достаточно тесно связан с временным ходом скорости ветра, однако коэффициенты корреляции широко варьируют по площади от 0,20 до 0,80 (табл. 4).

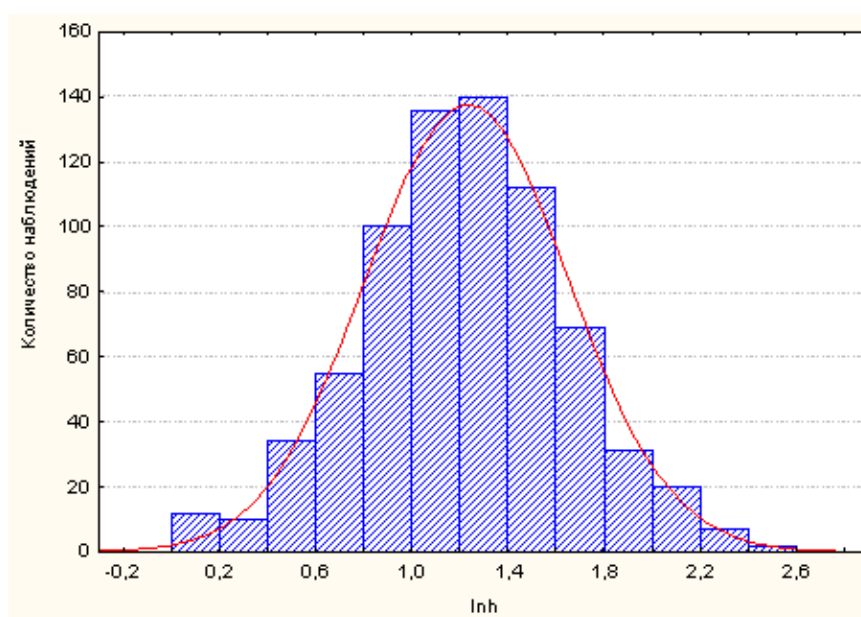
Очевидно, это зависит от того, какие системы волн преобладали в районе того или иного буя. Там, где преобладают волны зыби, которые слабо связаны с ветром, коэффициенты корреляции малы (0,2–0,5), а там, где преобладают системы ветрового



волнения, коэффициенты корреляции значительно больше (0,7–0,8). При этом высота ветровых волн обладает большей пространственной и временной изменчивостью, чем высота волн зыби. Эта особенность определяет различную статистическую структуру полей ветровых волн и полей волн зыби.

Наблюдаемая многомодальность в синоптической изменчивости скорости ветра и высоты волн может быть проинтерпретирована как проявление локальной неустойчивости ветро-волнового процесса вследствие регионального влияния динамики устойчивых атмосферных структур типа атмосферных фронтов, траекторий циклонов и т.д. Наибольшее практическое значение имеет ход максимумов высоты волн. Максимальные высоты волн уменьшаются с севера на юг. Наибольшая повторяемость максимальных высот волн приходится на первый район и на декабрь–февраль месяцы, хотя высоты волн более 10 м наблюдались и в других районах, и в другие месяцы. Наименьшая повторяемость штормового волнения отмечается в третьем районе, однако в этот район могут доходить крупные волны зыби от штормов, сформированных в северных широтах. Наибольшие средние месячные значения высоты волн преимущественно приходятся на первый и второй районы, а наименьшие – на третий район.

Ряды наблюдений за высотой волн характеризуются меньшей изменчивостью, чем ряды скорости ветра, и описываются логарифмически нормальным законом распределения. Пример гистограммы эмпирического распределения высоты волн с наложенной теоретической кривой логарифмически нормального распределения показан на рис. 4.



**Рис. 4. Гистограмма эмпирического распределения натурального логарифма высоты волн и ее аппроксимация теоретической кривой нормального закона распределения.**

Из рисунка видно, что эмпирическое распределение логарифмов высот волн хорошо аппроксимируется нормальной функцией логарифмического распределения. Этот рисунок позволяет получить общую картину диапазона изменчивости высот волн.

Наряду с моментными характеристиками ветра и высоты волн были рассчитаны: число случаев (повторяемость) превышения высотой волны пороговых значений:  $h_n > 4$ ,  $h_n > 6$ ,  $h_n > 8$  и  $h_n > 10$  м, среднее  $\bar{\tau}$  и максимальное время пребывания  $T_m$  (непрерывная продолжительность) нахождения высоты волны выше этих значений. Полученные результаты обобщены в табл. 5.

Анализ табл. 5 показывает, что средняя продолжительность штормов зависит от заданного порогового значения высоты волн. При превышении пороговой высоты волны 4 м она составляет для первого района порядка 30–40 ч, максимальная продолжительность может достигать 400 ч, а в отдельных случаях – до 500 ч.

Эти цифры уменьшаются по мере увеличения порогового уровня высоты волны и в направлении с севера на юг. Так, например, при пороговом уровне 4 м средняя продолжительность шторма в декабре 2010 г. составила в первом районе 70 ч, во втором районе – 47 ч и в третьем районе – 41 ч, а максимальная продолжительность – 318, 330 и 246 ч соответственно. В различные годы интенсивность волнения в один и тот же сезон существенно меняется. В отдельные месяцы различных лет средние высоты волн могут существенно отличаться.

Важной характеристикой, позволяющей косвенно судить об интенсивности штормов, является вероятность превышения высоты волн порогового уровня  $h_n$ . В табл. 6 представлены данные о среднем ( $\bar{n}$ ) количестве превышений  $h_n$  и процентном значении вероятностей  $P$ , %, превышения  $h_n$  по месяцам четырех холодных сезонов и по трем районам.

Анализ табл. 6 показывает, что вероятность превышения высоты волн пороговых значений  $h_n$  изменяется в довольно широком диапазоне как по месяцам, так и по годам. Например, при превышении пороговой высоты 4 м в первом районе вероятность изменялась в пределах от 11 до 67 %, во втором районе – от 10 до 56 %, в третьем районе – от 1 до 16 %. При превышении пороговой высоты 6 м в первом районе вероятность изменялась от 2 до 13 %, во втором районе – от 1 до 11 % и в третьем – от 1 до 8 %. При превышении пороговой высоты 8 м и 10 м средняя повторяемость в первом и втором районе не превышала 7 и 2 %

соответственно. Такие же значительные колебания вероятности отмечались и в отдельные годы и месяцы.

Таблица 5

**Средняя и максимальная продолжительность штормов по районам (в часах)**

Район	$h_n, м$	октябрь		ноябрь		декабрь		январь		февраль		март	
		$\bar{\tau}$	$T_m$	$\bar{\tau}$	$T_m$	$\bar{\tau}$	$T_m$	$\bar{\tau}$	$T_m$	$\bar{\tau}$	$T_m$	$\bar{\tau}$	$T_m$
<b>2009–2010 гг.</b>													
I	>4	102	138	51	465	70	318	40	414	28	210	23	168
	>6	15	24	24	210	18	102	13	60	14	48	9	30
	>8	6	6	15	66	10	24	–	–	8	12	–	–
II	>4	14	54	32	120	47	330	29	270	27	300	31	180
	>6	12	12	11	24	30	120	14	48	12	42	8	30
	>8	–	–	–	–	–	–	–	–	12	12	–	–
III	>4	0	0	16	51	41	246	28	168	16	72	25	174
	>6	–	–	–	–	36	102	10	24	12	12	12	12
<b>2010–2011 гг.</b>													
I	>4	25	228	35	504	29	270	37	294	92	578	41	408
	>6	12	54	17	246	16	54	18	60	38	318	16	120
	>8	11	18	14	78	12	18	6	6	16	102	7	24
	>10	–	–	9	36	–	–	–	–	9	12	–	–
II	>4	11	42	35	120	35	240	31	210	27	306	15	72
	>6	–	–	16	42	11	24	15	54	15	108	12	12
	>8	–	–	18	18	12	24	6	18	12	12	6	6
III	>4	–	–	22	120	52	330	16	60	17	72	8	24
	>6	–	–	30	60	17	108	6	6	9	12	–	–
	>8	–	–	6	6	6	6	–	–	–	–	–	–
<b>2011–2012 гг.</b>													
I	>4	29	306	42	450	61	504	55	492	29	420	35	360
	>6	9	54	15	120	26	216	29	180	18	96	24	114
	>8	6	6	15	18	15	78	13	60	6	6	26	48
	>10	–	–	12	12	8	12	6	6	–	–	14	24
II	>4	17	108	22	90	17	102	28	204	23	168	25	102
	>6	12	42	12	12	–	–	14	36	16	66	12	12
	>8	6	6	–	–	–	–	6	12	–	–	–	–
III	>4	33	54	23	132	15	54	18	36	18	72	17	42
	>6	6	6	12	18	–	–	12	12	12	24	6	6
	>8	–	–	–	–	–	–	–	–	6	6	6	6
<b>2012–2013 гг.</b>													
I	>4	20	144	31	402	34	354	44	528	49	318	35	282
	>6	12	18	15	90	20	96	21	150	23	102	17	96
	>8	6	6	–	–	12	24	19	66	24	48	–	–
	>10	–	–	–	–	6	6	–	–	20	36	–	–
II	>4	17	90	13	72	34	180	19	144	36	282	28	150
	>6	6	6	6	6	12	60	21	30	15	66	18	18
	>8	–	–	–	–	–	–	6	6	18	18	–	–
III	>4	41	108	25	126	16	96	16	48	15	24	34	162
	>6	34	66	–	–	8	24	–	–	–	–	24	66
	>8	12	36	–	–	–	–	–	–	–	–	6	6
	>10	12	12	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–

Таблица 6

**Среднее число превышений порогового уровня и их вероятность по месяцам  
четырех холодных сезонов**

Район	$h_n$	X		XI		XII		I		II		III	
		$\bar{n}$	P,%	$\bar{n}$	P,%	$\bar{n}$	P,%	$\bar{n}$	P,%	$\bar{n}$	P,%	$\bar{n}$	P,%
<b>2009/2010</b>													
I	>4	13	11	64	54	41	36	34	27	23	21	18	14
	>6	3	2,4	20	17	13	11	4	3	5	4	4	3
	>8	1	0,8	8	7	3	4	–	–	2	1,8	1	0,8
II	>4	14	11	13	11	56	49	23	19	26	23	25	20
	>6	3	2,4	3	2,5	15	13	7	5	4	3,7	5	4
	>8	–	–	–	–	–	–	–	–	2	2	–	–
III	>4	–	–	10	8	19	16	19	15	24	22	11	8,7
	>6	–	–	–	–	9	8	4	3	10	9	3	2
<b>2010/2011</b>													
I	>4	29	23	47	39	20	16	32	27	75	67	36	29
	>6	6	4	17	12	5	4	6	5	32	28	8	6,4
	>8	2	1,6	8	7	2	1,6	1	0,8	9	7,6	2	1,6
	>10	–	–	3	2,4	–	–	–	–	3	2,9	–	–
II	>4	6	6,1	17	17	38	30	25	21	39	35	11	8,9
	>6	5	4	4	4,4	4	2,8	9	6,8	13	11	2	1,6
	>8	–	–	3	3,4	4	3,2	3	2,4	3	2,7	1	0,8
III	>4	–	–	9	7,5	32	26	7	5,6	6	4,8	4	2,8
	>6	–	–	–	–	7	5,4	1	0,8	2	1,8	–	–
	>8	–	–	–	–	1	0,8	–	–	–	–	–	–
<b>2011/2012</b>													
I	>4	33	27	57	49	65	64	57	47	36	30	37	30
	>6	5	4,1	10	8,4	25	24	22	18	9	7,7	10	8,1
	>8	1	0,9	2	1,7	8	7,5	6	5,2	1	0,8	5	3,8
	>10	–	–	2	1,7	2	1,2	1	0,8	–	–	3	2,4
II	>4	19	15	15	13	15	13	19	15	27	26	17	14
	>6	3	2,4	4	3,6	4	3,4	5	3,7	8	8	2	1,6
	>8	–	–	–	–	–	–	2	1,2	–	–	–	–
III	>4	–	–	12	10	6	5,1	5	3,8	8	6,3	6	4,4
	>6	–	–	3	2,1	–	–	2	1,7	4	3	1	0,8
	>8	–	–	–	–	–	–	–	–	1	0,8	1	0,8
<b>2012/2013</b>													
I	>4	13	11	47	40	49	41	55	46	35	32	28	23
	>6	2	1,6	7	5,7	10	8,5	16	13	12	11	8	6,3
	>8	1	0,8	–	–	2	2,2	8	6,2	5	4,9	–	–
	>10	–	–	–	–	1	0,8	3	2,4	3	2,7	–	–
II	>4	12	9,6	11	8,9	29	24	21	18	41	37	18	14
	>6	1	0,8	1	0,8	7	5,8	4	3	9	8,2	3	2,4
	>8	–	–	–	–	–	–	1	0,8	3	2,7	–	–
III	>4	15	13	10	8,5	8	6,8	5	4	11	10	20	15
	>6	8	6,4	–	–	4	3,3	–	–	3	2,3	9	7,3
	>8	3	2,9	–	–	–	–	–	–	–	–	1	0,8

Так, например, на бую 62065 (первый район) в январе 2010 г. вероятность появления волн высотой больше 6 м составила всего 2,5 %, а в 2013 г. – 11 %. В третьем районе в январе 2010 г. волны больше 4 м вообще не наблюдалось, а в 2012 г. вероятность появления волн больше 4 м составила около 12,5 %, больше 6 м – 6,4 % и больше 8 м – 2,9 %.

Обобщенные месячные значения вероятностей превышений высотой волн пороговых значений за все четыре холодных сезона по трем районам приведены в табл. 7.

Таблица 7

**Обобщенная таблица месячных значений вероятностей превышений высотой волны пороговых значений  $h_n$  (%)**

Район	$h_n$ , м	X	XI	XII	I	II	III
I	>4	18,0	45,5	39,3	36,8	37,5	24,0
	>6	3,0	10,8	11,9	9,8	12,7	6,0
	>8	1,0	5,2	3,8	4,1	3,8	2,1
II	>4	10,4	12,5	29,0	18,3	30,3	14,2
	>6	2,4	2,8	6,3	4,6	7,7	2,4
	>8	–	3,4	3,3	1,5	2,7	0,8
III	>4	13,0	8,5	13,5	7,1	10,8	7,7
	>6	–	2,1	5,6	1,8	4,0	3,4
	>8	–	–	0,8	–	0,8	0,8

Из табл. 7 видно, что наиболее штормовыми месяцами являются ноябрь, декабрь и февраль, а наиболее штормовым районом является первый район.

### Выводы

1. Анализ результатов статистической обработки временных рядов скорости ветра и высоты волн с 6-часовой дискретностью, построенных по данным буйковых измерений за последние четыре холодных сезона, иллюстрирует существенную неоднородность распределения статистических показателей во времени и по акватории Северной Атлантики, обусловленную большим разнообразием физико-географических и климатических условий.

Наибольшие средние месячные скорости ветра характерны для первого и второго районов (от 8,6 до 9,2 м/с), а наименьшие – для третьего района (от 7,1 до 7,4 м/с). Максимальная скорость ветра за весь рассматриваемый период в первом районе составила 42 м/с, во втором районе – 24 м/с и в третьем районе – 25 м/с. В помесечном ходе среднеквадратичного отклонения  $\sigma$  средней месячной скорости ветра проявляется сезонная изменчивость. Наибольшие значения  $\sigma$  характерны для зимних месяцев (декабрь, январь, февраль) первого и второго районов ( $\sigma=3,0-4,5$  м/с.), и несколько меньше – для ближайших

к ним осенних (октябрь–ноябрь) и весеннего месяца (март). В третьем районе значения  $\sigma$  изменялись от 1,8 до 3,8 м/с.

Диапазон изменчивости высоты волн и скорости их роста значительно больше в зимние месяцы (декабрь–февраль), чем в другие месяцы (октябрь, ноябрь, март)., За рассматриваемый период среднемесячная высота волн по годам менялась незначительно: в первом районе от 3,4 до 3,8 м, во втором районе от 2,8 до 3,2 м и в третьем районе от 2,0 до 2,4 м. Максимальная за месяц высота волн в первом районе составила 14,7 м, во втором районе – 11,1 м и в третьем районе – 10,9 м.

2. Средняя продолжительность штормов зависит от заданного порогового значения высоты волн. При превышении пороговой высоты волны 4 м она составляет для первого района порядка 30-40 ч, а максимальная продолжительность может достигать 400 ч, а в отдельных случаях увеличиваясь до 500 ч. Эти цифры уменьшаются по мере увеличения порогового уровня высоты волны и в направлении с севера на юг.

3. Вероятность превышения пороговых значений  $h_n$  изменяется в довольно широком диапазоне, как по месяцам, так и по годам. Так, при превышении пороговой высоты 4 м, в первом районе вероятность изменялась в пределах от 11 до 67 %, во втором районе от 10 до 56 % и в третьем районе от 1 до 16 %. При превышении 6 м в первом районе она изменялась в пределах от 2 до 13 %, во втором районе от 1 до 11 % и в третьем от 1 до 8 %. При превышении 8 м и 10 м средняя повторяемость в первом и втором районах не превышала 7 и 2 % соответственно.

4. Учитывая сложность проблемы, полученные результаты не являются окончательными и исследования в этом направлении будут продолжены. Основной путь совершенствования статистики синоптической изменчивости параметров волн лежит в создании многолетних массивов данных буйковых измерений ветра и волн, а также спутниковых измерений. Все эти данные в комплексе позволят более точно оценить статистические характеристики параметров ветра и волн на различных интервалах их пространственно-временной изменчивости.

#### Список использованных источников

1. Абузяров З.К., Сиротов К.М., Сетт Л.С. К вопросу о пространственно-временной изменчивости высоты волн в Северной Атлантике // Труды Гидрометцентра СССР. – 1988. – Вып. 292. – С. 136–146.

2. *Абузяров З.К.* К вопросу об объективном анализе полей высот волн и их статистической структуре // Труды Гидрометцентра СССР. – 1984. – Вып. 263. – С. 53–64.

3. *Бабич С.В., Боков В.Н., Лопатухин Л.И.* Вероятностный анализ и моделирование синоптической, сезонной и межгодовой изменчивости ветра и волнения // Вероятностный анализ и моделирование океанологических процессов. – Л.: Гидрометеиздат, 1984. – С. 43–78.

4. *Бирман Б.А., Клен Л.А., Пармузина Т.А.* Вероятность и продолжительность опасных для навигации скоростей ветра в Северной Атлантике // Труды ВНИИГМИ-МЦД. – 1980. – Вып.64. – С. 14–37.

5. *Боровиков В.П., Боровиков И.П.* STATISTICA. Статистический анализ и обработка данных в среде Windows. – М.: Филинь, 1997. – 608 с.

6. *Давидан И.Н., Лопатухин Л.И., Рожков В.А.* Ветровое волнение в Мировом океане. – Л.: Гидрометеиздат, 1985. – 256 с.

7. *Лопатухин Л.И., Заковряшин Ю.Д., Шатов Б.Н.* Вероятностные характеристики штормов по натурным данным // Проблемы исследования и математического моделирования ветрового волнения. – СПб.: Гидрометеиздат, 1995. – С. 423–431.

8. *Матушевский Г.В.* Новый тип режимной функции распределения параметров ветровых волн // Метеорология и гидрология. – 1977. – № 3. – С. 66–72.

9. *Матушевский Г.В., Надеев В.В.* Статистические закономерности распределения характеристик устойчивости ветрового волнения // Метеорология и гидрология. – 1987. – № 5. – С.70–75.

10. *Режим, диагноз и прогноз ветрового волнения в океанах и морях / под ред. Е.С.Нестерова.* – М., Обнинск: ИГ-СОЦИН, 2013. – 295 с.

*Поступила в редакцию 20.09.2013 г.*

Таблица 2

Обобщенная статистика ветра ( $W$ ) и высоты волн ( $h$ ) по месяцам для буев, осредненных по трем районам Северной Атлантики

Район		октябрь			ноябрь			декабрь			январь			февраль			март		
		$\bar{\Delta}$	$\sigma$	$m$	$\bar{\Delta}$	$\sigma$	$m$	$\bar{\Delta}$	$\sigma$	$m$	$\bar{\Delta}$	$\sigma$	$m$	$\bar{\Delta}$	$\sigma$	$m$	$\bar{\Delta}$	$\sigma$	$m$
<b>2009–2010 гг.</b>																			
I	$W$	7,2	2,9	17	9,7	3,6	23	8,6	3,5	25	8,1	3,8	21	8,6	3,3	23	8,9	2,8	17
	$h$	2,7	1,0	8,2	4,5	1,6	12	3,8	1,5	11	3,4	1,2	10	3,0	1,2	10	2,9	1,1	7,0
II	$W$	8,2	4,3	23	7,7	4,3	16	10,7	4,3	24	8,9	3,8	19	10,0	4,4	22	8,8	4,1	20
	$h$	2,6	1,3	7,4	2,7	1,1	6,2	4,3	1,5	8,0	2,9	1,2	7,3	3,8	1,4	11	2,8	1,4	6,5
III	$W$	6,1	2,2	13	6,2	2,9	14	8,1	3,3	18	7,4	3	16	7,7	3,1	18	7,1	2,9	16
	$h$	1,5	0,5	3,7	2,2	0,8	6,0	2,7	1,1	8,1	2,5	0,8	6,4	2,9	1,0	11	2,3	0,9	7,2
<b>2010–2011 гг.</b>																			
I	$W$	7,8	3,3	17	8,9	4,0	42	7,9	3,4	19	8,0	3,5	20	9,4	3,8	22	7,7	3,3	19
	$h$	3,1	1,4	8,9	3,8	1,9	12	3,1	1,3	13	3,1	1,2	8,7	5,1	1,8	15	2,9	1,1	11
II	$W$	7,4	3,4	16	8,7	3,8	21	8,8	3,8	23	8,8	4,3	21	11	4,5	24	8,5	3,7	22
	$h$	2,4	0,9	6,0	2,8	1,4	8,8	3,6	1,4	9,1	2,8	1,4	8,4	3,8	1,5	10	2,7	1,1	8,1
III	$W$	6,4	2,6	17	7,4	3,0	18	9,2	3,9	21	7,2	3,1	19	7,2	2,8	19	7,1	2,9	17
	$h$	1,7	0,7	5,4	2,3	1,0	8,9	3,2	1,5	8,5	2,1	0,8	7,8	2,0	0,8	7,1	2,0	0,7	4,9
<b>2011–2012 гг.</b>																			
I	$W$	9,0	3,1	20	9,5	3,4	26	11,1	4,0	25	9,7	3,6	23	8,2	3,0	20	7,8	3,3	25
	$h$	3,4	1,1	8,0	3,9	1,2	13	5,0	1,7	14	4,1	1,6	12	3,0	0,9	9,1	3,5	1,6	13
II	$W$	7,2	4,5	24	8,6	3,6	16	8,5	4,0	18	9,1	4,0	23	9,8	4,2	22	8,9	3,6	18
	$h$	2,5	1,6	8,9	2,7	1,1	6,9	2,7	1,1	7,7	3,2	1,3	8,8	3,3	1,5	7,8	2,5	1,3	6,7
III	$W$	6,6	3,1	18	7,9	3,4	21	7,8	3,2	19	6,7	2,9	23	6,7	3,1	21	7,0	3,1	19
	$h$	1,7	0,7	6,9	2,3	1,1	7,9	2,4	0,8	5,6	1,8	0,8	6,7	1,9	0,9	9,5	1,9	0,8	8,5
<b>2012–2013 гг.</b>																			
I	$W$	7,7	3,2	22	9,4	3,5	21	9,5	3,7	21	9,7	3,7	24	9,6	3,8	23	8,4	3,9	22
	$h$	2,7	1,0	8,9	3,6	1,2	7,7	3,9	1,4	11	4,3	1,7	12	3,8	1,7	11	3,1	1,3	7,9
II	$W$	8,2	3,4	16	7,9	3,5	18	9,1	4,4	20	10,3	3,8	22	7,9	3,8	17	8,0	4,0	18
	$h$	2,5	1,0	6,2	2,7	1,1	6,1	2,9	1,7	9,5	3,0	1,2	8,3	3,5	1,7	8,9	9,5	1,2	7,7
III	$W$	7,1	3,8	25	6,7	2,9	15	7,1	2,9	16	6,9	2,6	16	7,1	2,9	16	7,5	3,1	19
	$h$	2,3	1,7	11	2,3	0,5	5,7	2,2	0,9	6,0	2,0	0,7	6,0	2,3	0,9	6,9	2,7	1,2	8



Таблица 4

## Коэффициенты корреляции между высотой волны и скоростью ветра для выборочных буев

Район	Номера буев	2009–2010 гг.				2010–2011 гг.				2011–2012 гг.				2012–2013 гг.			
		XI	XII	I	II	XI	XII	I	II	XI	XII	I	II	XI	XII	I	II
<b>I</b>	62001	0,7	0,3	0,3	0,5	<b>0,6</b>	0,4	0,1	0,3	0,4	–	0,5	<b>0,6</b>	–	–	<b>0,6</b>	0,7
	62095	<b>0,8</b>	<b>0,6</b>	<b>0,6</b>	–	–	<b>0,6</b>	<b>0,7</b>	–	0,5	–	<b>0,7</b>	0,4	0,4	<b>0,6</b>	–	<b>0,6</b>
	62105	–	–	–	–	<b>0,7</b>	<b>0,7</b>	<b>0,6</b>	<b>0,6</b>	<b>0,7</b>	<b>0,6</b>	0,5	<b>0,7</b>	0,4	0,3	–	0,4
	64045	0,4	0,2	–	–	<b>0,6</b>	<b>0,7</b>	<b>0,6</b>	0,5	<b>0,7</b>	–	<b>0,7</b>	<b>0,6</b>	<b>0,7</b>	<b>0,6</b>	–	–
<b>II</b>	44137	–	–	0,4	0,3	<b>0,8</b>	<b>0,7</b>	<b>0,7</b>	<b>0,7</b>	<b>0,6</b>	–	0,5	<b>0,7</b>	<b>0,6</b>	<b>0,7</b>	<b>0,7</b>	–
	44139	–	0,3	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0,5	<b>0,6</b>	<b>0,7</b>	–
<b>III</b>	41010	<b>0,8</b>	<b>0,7</b>	<b>0,8</b>	<b>0,8</b>	0,4	–	<b>0,8</b>	<b>0,6</b>	<b>0,6</b>	–	<b>0,7</b>	0,5	<b>0,6</b>	<b>0,6</b>	<b>0,6</b>	<b>0,7</b>
	41043	0,4	<b>0,6</b>	0,5	0,1	0,3	<b>0,7</b>	0,4	0,2	0,5	–	0,2	0,5	0,4	0,3	0,2	0,3
	41047	–	–	–	–	<b>0,7</b>	<b>0,7</b>	<b>0,6</b>	0,3	<b>0,7</b>	<b>0,6</b>	0,5	0,4	<b>0,6</b>	0,3	–	0,4
	41048	–	<b>0,6</b>	–	–	–	<b>0,8</b>	<b>0,7</b>	0,5	<b>0,8</b>	0,4	0,5	<b>0,6</b>	<b>0,6</b>	<b>0,6</b>	0,5	0,4
	41049	–	–	0,4	0,3	0,5	0,5	0,2	0,4	–	0,5	0,5	0,5	0,4	0,4	–	–

Примечание: Жирным выделены коэффициенты корреляции, равные 0,6 и более.