

## ВЕТЕР И ВОЛНЫ В ПЕЧОРСКОМ МОРЕ

зав. лаб. В.И.ДЫМОВ<sup>1</sup>, д-р геогр. наук Г.К.ЗУБАКИН<sup>1</sup>,  
науч. сотр. Ю.П.КЛЕВАНЦОВ<sup>2</sup>, д-р физ.-мат. наук В.А.РОЖКОВ<sup>3</sup>,  
науч. сотр. Е.А.СКУТИНА<sup>1</sup>

<sup>1</sup> – ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, e-mail: zubakin@aari.ru

<sup>2</sup> – СПО ФГБУ «Государственный океанографический институт имени Н.Н.Зубова», Санкт-Петербург, e-mail: spbsoi@rambler.ru

<sup>3</sup> – Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, e-mail: varozhk@gmail.com

На основе результатов многомерного статистического анализа ансамбля полей ветра и волнения, полученных путем модельного расчета спектра волн по данным реанализа полей скорости ветра за 1949–2005 гг., обсуждаются дискуссионные вопросы содержания и структуры подготовляемого к изданию справочного пособия по режиму ветра и волнения в Печорском море.

**Ключевые слова:** границы льдов, кромка льда, вектор скорости ветра; высоты, периоды, направления распространения ветрового и смешанного волнения, зыби; синоптическая, сезонная, межгодовая изменчивость волн и ветра.

В Печорском море в настоящее время ведется интенсивное освоение шельфа в интересах добычи нефти и газа, а также сохраняется интенсивное судоходство судов различного класса. Поэтому актуальна задача создания режимных обобщений по ветру и волнению, а также их детализации.

До сих пор используются справочники [Ветер и волны, 1974; Справочные данные, 2003], первый из них составлен по материалам попутных судовых наблюдений, второй – по результатам модельных расчетов волн по полям ветра. Печорское море в этих справочниках не выделено в отдельный район. Режим ветра рассмотрен в работе [Дементьев и др., 2009] по данным измерений скорости ветра на ГМС, расположенных на суше в бассейне реки Печоры.

Цель настоящей статьи состоит в обсуждении проблем, возникающих при создании современного справочника по ветру и волнам в Печорском море:

а) часть года море покрыто льдом, сроки замерзания/таяния и границы ареала ледяного покрова  $\xi(\vec{r}, t)$  – первоочередная задача;

б) скорость ветра  $\vec{W}(\vec{r}, t)$  – вектор с модулем  $|\vec{W}|$  и направлением  $\varphi$ , поле ветра  $\vec{W}(\vec{r}, t)$  неоднородно в пространстве и подвержено синоптической, сезонной и межгодовой изменчивости; вторая задача – какие из вероятностных характеристик необходимы для описания временной изменчивости и пространственной неоднородности поля ветра;

в) волнение  $\zeta(\vec{r}, t)$  обусловлено полем ветра  $\vec{W}(\vec{r}, t)$ , не только в данный момент времени – ветровое волнение (ВВ), но и в предшествующие сроки – зыбь (З), смешанное волнение (СВ), а также контуром  $\xi(\vec{r}, t)$ ; основной вероятностной

характеристикой волнового поля является частотно-направленная спектральная плотность  $S_{\zeta}(\omega, \theta, \vec{r}, t)$ , зависящая от частоты  $\omega$ , направления распространения волн  $\theta$ , пространственных координат  $\vec{r}$  и времени  $t$ ; третья задача – какие из вероятностных характеристик необходимы для описания временной изменчивости и пространственной неоднородности волнового поля  $\zeta(\vec{r}, t)$  и его связи с полем ветра  $\vec{W}(\vec{r}, t)$ .

### ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И ИХ ХАРАКТЕРИСТИКА

В настоящей работе исходными данными по режиму ветра является массив реанализа [Kalnay et al., 1996] с дискретностью 3 ч и продолжительностью с 1949 по 2006 г.

Исходные данные по режиму волнения – результаты расчетов волн по полям ветра по параметрической модели [Давидан и др., 2009] на сетчатой области с шагом  $2^\circ$  по широте (от  $51^\circ$  до  $57^\circ$  в.д.) и  $0,5^\circ$  по долготе (от  $69^\circ$  до  $70^\circ$  с.ш.), т.е. всего 12 точек на акватории Печорского моря, с дискретностью по времени 3 ч и с учетом границ ледяного покрова.

Исходными данными по ледовому режиму являются архивные материалы и результаты наблюдений последних лет. Сведения о распространении льда на акватории юго-восточной части Баренцева моря и, в частности, в Печорском море – ледовые карты, охватывающие период с 1950 по 2010 г. Особо следует отметить, что с 1986 г. комплексные карты составляют по снимкам ИСЗ, при этом составление карт является круглогодичным с дискретностью 1 неделя.

### КРОМКА ДРЕЙФУЮЩИХ ЛЬДОВ ЮГО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ БАРЕНЦЕВА МОРЯ

Последние обобщенные сведения по границам распространения льда в вероятностной форме были представлены в [Гидрометеорология..., 1990] и ограничивались 1985 г. Данные последних лет внесли существенные изменения в оценки положения кромки льда, ледовитости и других характеристик [Зубакин, Бузин, 2009; Бузин, Зубакин, 2009] за счет более раннего начала таяния льдов. Так, в юго-восточной части Баренцева моря и в частности в Печорском море зафиксировано отступление среднемесячной кромки льдов на восток от климатической нормы. Смещение границ льда в апреле (в период максимального развития ледяного покрова) составило: 0 миль на  $69^\circ$  с.ш., 30 миль по параллели  $70^\circ$  с.ш., 50 миль по параллели  $71^\circ$  с.ш., 35 миль по параллели  $72^\circ$  с.ш.

Как правило, при проведении расчетов используют среднее положение кромки льда на акватории, для которой проводится оценка. Среднее положение кромки льдов в периоды нарастания и таяния ледяного покрова, построенные по данным за 1950–2010 гг., приведены на рис. 1. Эта характеристика ледового режима включает в себя различные положения кромки в течение месяца и является очень изменчивой.

Для описания изменчивости положения кромки дрейфующих льдов используем понятие «кромка  $k$ -процентной вероятности». Для построения таких кромок используем следующий подход:

- выбираем месяц  $m$ ;
- фиксируем широту  $\varphi$  и рассмотрим изменение положения кромки льда по долготе на данной широте для месяца  $m$  за все годы, когда проводились наблюдения;
- строим функцию распределения  $F(x|\varphi, m)$  значений долготы  $\lambda$  (точек, в которых кромка пересекала выбранную параллель) и выделим значения  $\lambda_k$  такие, что  $F(x = \lambda_k|\varphi, m) = k$  (рис. 2).

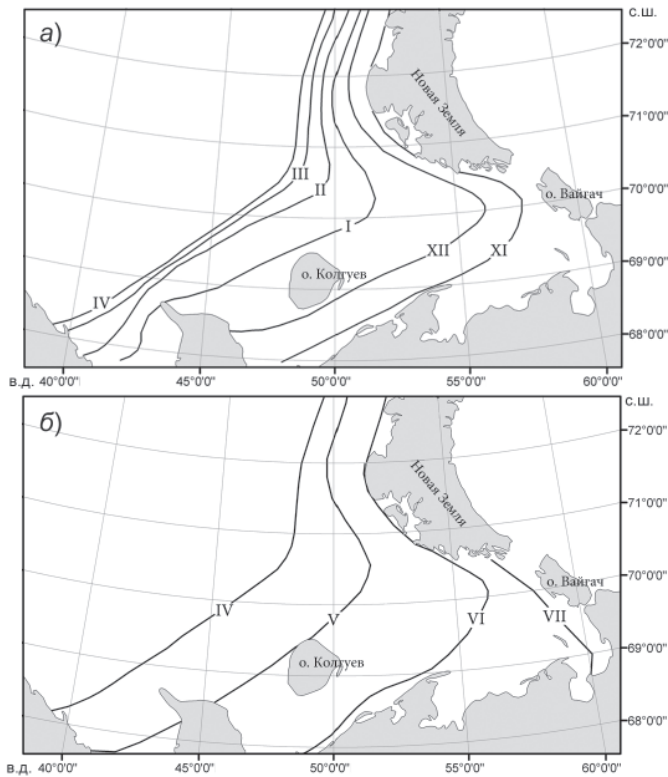


Рис. 1. Среднемесячное положение границ распространения льда в юго-восточной части Баренцева моря в период замерзания (а) и таяния (б) по данным 1950–2010 гг. Римскими цифрами обозначены месяцы.

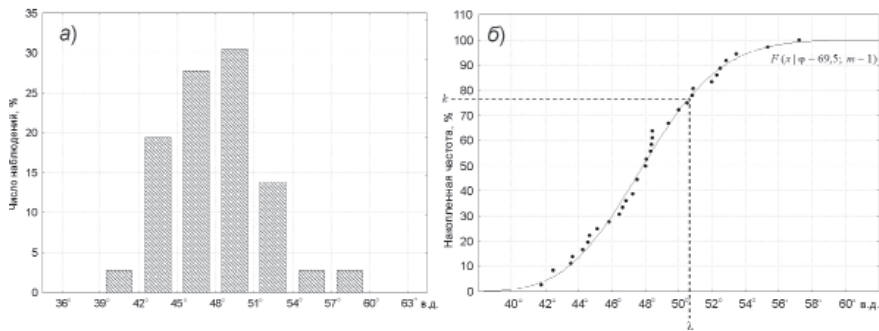


Рис. 2. Распределение значений долготы, на которых кромка льдов пересекала широту  $69^{\circ}30'$  с.ш. в январе в период с 1950 по 2010 г.

Под «кромкой  $k$ -процентной вероятности» будем понимать линию, заданную набором координат  $(\varphi, \lambda_k)$ .

На рис. 3 приведены границы положения кромок льда различной вероятности для января и июля, построенные по данным наблюдений за ледяным покровом в период 1950–2010 гг. Шаг по широте при построении соответствующих линий составил  $30'$ .

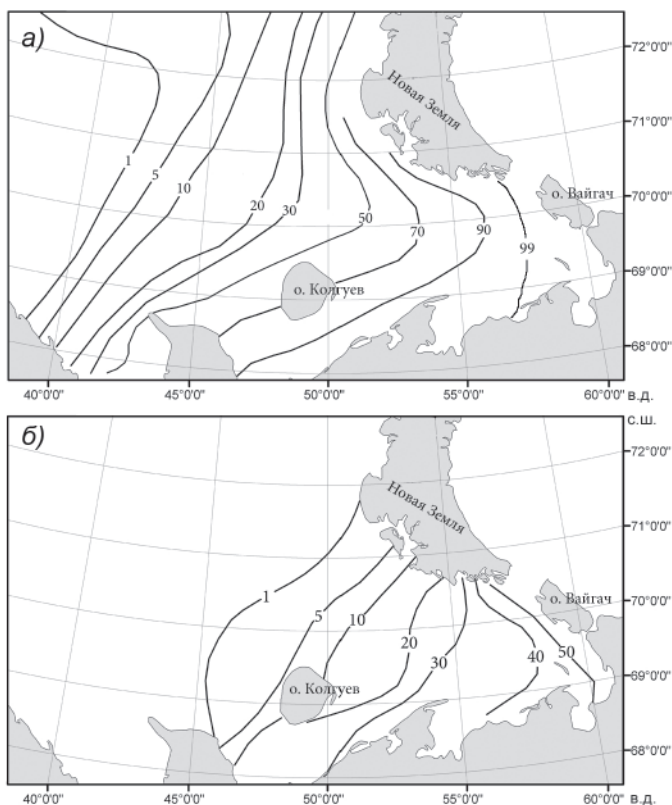


Рис. 3. Положение кромки льда различной вероятности в январе (а) и июле (б) по данным за период 1950–2010 гг. Цифрами обозначены значения вероятности.

Приведенные на рисунках границы 50 % вероятности трактуются как среднемноголетнее положение кромки льдов, 1 % – случаи максимального распространения ледяного покрова, 99 % – границы, в пределах которых ледяной покров находится практически постоянно (минимальное распространение ледяного покрова).

Приведенные ниже результаты анализа параметров ветра и волнения соответствуют модельным расчетам по среднему положению кромки льда для различных месяцев. Для описания «экстремальных ситуаций» модельный расчет необходимо проводить с использованием вероятностных границ распространения льда. В прикромочных областях рекомендуется вводить соответствующие поправки, методика получения которых изложена в работах [Зубакин, 1976; 1977].

### ВЕТЕР

Традиционно повторяемость  $p(|\vec{W}|, \varphi)$  скорости ветра по румбам (N, NO, O, SO, S, SW, W, NW), так называемая «роза ветров», является одной из основных режимных характеристик скорости ветра. Она приведена в табл. 1, где по вертикали даны градации направления  $\varphi$ , ветра в градусах, центр которых соответствует названию румба; по горизонтали градации модуля скорости  $|\vec{W}|_j$  через 4 м/с в интервале от 0 до 32 м/с; в каждой (ij) клетке приведена повторяемость этой ситуации  $p_{ij} = n_{ij}/n$ , где  $n_{ij}$  – число

значений вектора, попавших в заданную градацию; последний столбец – маргинальное распределение  $p_i$  – повторяемость ветра по румбам, последняя строка – маргинальное распределение  $p_j$  – повторяемость модуля скорости ветра по заданным градациям.

Легче всего по этой таблице сделать вывод о повторяемости направлений ветра. Согласно табл. 1 в Печорском море это распределение близко к равномерному с незначительным преобладанием ветра от SW и W.

Для облегчения интерпретации табличных данных в работе [Рожков и др., 2009] предложены еще две формы представления (квантильная и моментная) результатов статистического анализа векторов скорости ветра.

Первая из них базируется на детализации маргинального распределения модуля скорости ветра и на условном распределении (штиль, модуль скорости ветра в заданном направлении).

Таблица 1

**Повторяемость скорости ветра по румбам, % (объем выборки 125056 сроков)**

Направление $\varphi$ , °	Модуль скорости ветра $ \vec{W} $ , м/с							$p(\varphi)$
	[0, 4)	[4, 8)	[8, 12)	[12, 16)	[16, 20)	[20, 24)	[24, 28)	
[-22,5; 22,5)	1,38	4,89	3,67	0,99	0,13	0,01	0,00	11,1
[22,5; 67,5)	1,33	4,83	3,18	0,84	0,10	0,01	0,00	10,3
[67,5; 112,5)	1,33	4,85	4,14	1,24	0,10	0,00	0,00	11,7
[112,5; 157,5)	1,21	4,43	3,84	1,17	0,15	0,01	0,00	10,8
[157,5; 202,5)	1,20	4,55	4,20	1,92	0,39	0,05	0,00	12,3
[202,5; 247,5)	1,18	4,75	5,48	3,62	1,20	0,17	0,02	16,4
[247,5; 292,5)	1,29	4,61	4,91	2,89	0,89	0,15	0,01	14,8
[292,5; 337,5)	1,23	4,87	4,42	1,75	0,36	0,05	0,01	12,7
$p( \vec{W} )$	10,15	37,77	33,85	14,42	3,33	0,45	0,04	–

В табл. 2 приведены значения квантильной функции  $x_p$  ранжированной выборки модуля скорости ветра. Члены такой выборки называются порядковыми статистиками и являются оценками квантилей  $x_p$ , при заданном  $p$  порядковый номер определяется как целая часть числа  $np + 1$ .

Согласно табл. 2 квантили  $x_{0,75} = 5,8$  м/с,  $x_{0,25} = 10,9$  м/с, медиана  $Me \equiv x_{0,5} = 8,1$  м/с, наибольшее значение  $28,6$  м/с, размах  $R = x_{\max} - x_{\min} = 28,6$  м/с, так как наименьшее значение – штиль; интерквартильное расстояние  $Q = x_{0,25} - x_{0,75} = 5,1$  м/с, «трехсреднее» значение  $T = (x_{0,25} + x_{0,75} + 2x_{0,5})/4 = 8,2$  м/с. Показатель  $T$  служит квантильной оценкой среднего значения выборки, а показатели  $Q$  и  $R$  позволяют оценить среднеквадратическое отклонение  $\sigma$  (СКО).

В табл. 3 приведены значения объемов выборок  $n$  условных распределений модуля скорости ветра по румбам, пяти квантилей  $x_{\min}, x_{0,75}, x_{0,5}, x_{0,25}, x_{\max}$  и значения показателей  $(Q, R, T)$ .

Из табл. 3 видно, что медианы модуля скорости ветра и его наибольшие значения условных распределений довольно существенно отличаются от  $8,1$  м/с и  $28,6$  м/с маргинального распределения (табл. 2).

В табл. 4 приводятся результаты оценивании моментов (двухмерных) евклидовых векторов скорости ветра. Математическое ожидание  $\vec{m}_W$  – вектор с модулем  $|\vec{m}_W|$  и направлением  $\varphi_m$ , дисперсия  $D_W$  – тензор, геометрическим образом которого является эллипс с осями  $\lambda_1, \lambda_2$ , инвариантами  $I_1 = \lambda_1 + \lambda_2, \chi = \lambda_1/\lambda_2$ ; геометрический

Таблица 2

Квантильная функция  $x_p$  модуля скорости ветра

$p$	$x_p$	$p$	$x_p$	$p$	$x_p$
100 % (min)	–	75 %	5,8	20 %	11,7
99 %	1,7	70 %	6,3	15 %	12,5
97 %	2,5	60 %	7,2	10 %	13,6
95 %	3,0	50 %	8,1	5 %	15,3
90 %	3,9	40 %	9,2	3 %	16,5
85 %	4,6	30 %	10,3	1 %	18,7
80 %	5,2	25 %	10,9	0 % (max)	28,6

Примечания: а) используется термин «обеспеченность»  $F^* = 1 - F$ ; б)  $p = 100\%$  и  $p = 0\%$  в теории вероятности не может быть (это «сленг»); в математической статистике ранжированный ряд всегда ограниченного объема (объема выборки  $n$ ), поэтому в этой и последующих таблицах  $p = 100\%$  и  $p = 0\%$  – это абстракция, крайним членам выборки  $x_i$  объема  $n$  в математической статистике присвоено наименование  $(x_{\min}^*, x_{\max}^*)$ ; в) термин  $p$  – вероятность во всей статье следует понимать как оценку  $p^*$  вероятности событий, т.е.  $p = 100\%$  соответствует  $x_{\min}^*$ ,  $p = 0\%$  –  $x_{\max}^*$ .

Таблица 3

## Квантильные характеристики условных распределений модуля скорости ветра по румбам

Румб	$n_i$	$x_{\min}$	$x_{0,75}$	$x_{0,5}$	$x_{0,25}$	$x_{\max}$	$Q$	$R$	$T$
N	13836	0,50	5,30	7,40	9,80	22,70	4,50	22,20	7,48
NE	12864	0,60	5,20	7,20	9,40	22,40	4,20	21,80	7,25
E	14591	0,40	5,60	7,70	10,10	21,10	4,50	20,70	7,78
SE	13523	0,60	5,60	7,80	10,10	23,20	4,50	22,60	7,83
S	15406	0,50	5,90	8,30	11,10	28,60	5,20	28,10	8,40
SW	20520	0,40	6,70	9,60	12,70	27,00	6,00	26,60	9,65
W	18448	0,30	6,20	9,10	12,20	26,60	6,00	26,30	9,15
NW	15859	0,70	5,70	8,10	10,80	26,40	5,10	25,70	8,18

Таблица 4

## Средние значения вектора скорости ветра и инварианты тензора СКО

Параметр	$ \bar{m}_{\vec{W}} $	$\varphi_m$	$I_1^{0,5}$	$\lambda_1^{0,5}$	$\lambda_2^{0,5}$	$\chi^{0,5}$	$r$
Значение	1,4	242	9,2	6,8	6,2	0,9	6,5

образ СКО – эллипс с осями  $\lambda_1^{0,5}$ ,  $\lambda_2^{0,5}$  инвариантами  $I_1^{0,5}$ ,  $\chi^{0,5}$ . Коэффициент вариации определяется как  $r \equiv I_1^{0,5} / |\bar{m}_{\vec{W}}|$ . Наиболее интересно, что эллипс СКО близок к окружности и что изменчивость  $I_1^{0,5}$  в 6,5 раз больше  $|\bar{m}_{\vec{W}}|$ .

## ВЕТРОВОЕ ВОЛНЕНИЕ

Воздействие ветра  $\vec{W}(\vec{r}, t)$  на водную поверхность создает ветровое волнение  $\xi(\vec{r}, t)$ , характеризуемое спектром  $S_\xi(\omega, \theta, \vec{r}, t)$ .

Ветровое волнение является мелкомасштабным гидрометеорологическим процессом с характерным временным масштабом несколько секунд и пространственным масштабом до нескольких десятков метров. Условия волнообразования меняются в

течение нескольких часов или суток из-за движения барических образований и за более продолжительное время из-за вариации макромасштабных циркуляционных атмосферных процессов. Поэтому мелкомасштабный процесс волнения приобретает синоптическую изменчивость, подверженную годовой ритмике и межгодовой модуляции.

Обычно спектральную плотность волнения представляют в виде произведения частотного спектра  $S(\omega)$  на функцию углового распределения  $Q(\omega, \theta)$ :

$$S(\omega, \theta) = S(\omega) \cdot Q(\omega, \theta).$$

Моменты частотного спектра определяются как

$$m_k = \int \omega^k S(\omega) d\omega.$$

Тогда  $m_0$  – дисперсия волнового процесса  $\bar{h} = \sqrt{2\pi m_0}$ ,  $h_s = 4\sqrt{m_0}$ ,  $\bar{\omega} = m_1/m_0$  – средняя частота; средний период волн может быть определен двояко: либо  $\bar{\tau} = 2\pi/\bar{\omega}$ , либо  $\bar{\tau} = 2\pi\sqrt{m_0/m_2}$ .

Среднее направление распространения волн определяется [Давидан, Рожков, 2002] как:

$$\bar{\theta} = \arctg(\sin\bar{\theta}/\cos\bar{\theta}),$$

$$\sin\bar{\theta} = \iint_{(\omega, \theta)} \sin\theta S(\omega, \theta) d\omega d\theta,$$

$$\cos\bar{\theta} = \iint_{(\omega, \theta)} \cos\theta S(\omega, \theta) d\omega d\theta.$$

Результаты модельных расчетов волнового поля в каждый синоптический срок и в каждом узле сеточной области представляются системой трех случайных величин  $(\bar{h}, \bar{\tau}, \bar{\theta})$ , характеризующих средние характеристики видимых волн на промежутке квазистационарности и на участке квазиоднородности. В непараметрических моделях предполагается, что волнение смешанное (СВ); в параметрических моделях – дополнительно выделяются системы ветрового волнения (ВВ) и зыби (З). В настоящей работе волнение сначала считается смешанным, а затем оценивается вклад в СВ компонент ВВ и З.

### СОВМЕСТНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ВЫСОТ И ПЕРИОДОВ ВОЛН

Повторяемость  $p(h, \tau)$  и обеспеченность  $F(h, \tau)$  средних высот и периодов волн, квантильные функции  $h_p, \tau_p$  маргинальных распределений, а также средние значения  $m(\tau|h)$  и СКО  $\sigma(\tau|h)$  условных распределений  $p(\tau|h)$  периодов волн фиксированной высоты приведены в табл. 5, 6, 7.

По данным табл. 5 можно вычислить, что в среднем  $m_h = 0,78$  м,  $m_\tau = 3,1$  с; коэффициент корреляции между этими случайными величинами равен 0,97, что характерно для ветрового волнения; но зависимость (как следует из табл. 7) отличается от линейной; наибольшие средние значения высот волн – 4,2 м, периодов волн – 6,8 с.

В табл. 8 приведены средние и максимальные значения высот ветровых волн и зыби, периодов ветровых волн по сезонам в двух точках  $69^\circ$  с.ш.,  $51^\circ$  в.д. и  $70^\circ$  с.ш.,  $51^\circ$  в.д.

Из табл. видно, что  $\bar{h}_{ВВ}$ ,  $\bar{h}_3$ ,  $\bar{\tau}_{ВВ}$  и наибольшие значения этих величин изменяются по сезонам и в пространстве;  $\bar{h}_{ВВ}$  варьирует от 0,4 м до 0,8 м, наибольшие значения достигают 5,7 м;  $\bar{h}_3$  варьирует от 0,2 м до 0,4 м, наибольшие значения достигают 4,3 м;  $\bar{\tau}_{ВВ}$  варьирует от 2,8 с до 4,0 с, наибольшие значения достигают 12,2 с.

Таблица 5

**Повторяемость  $p(h, \tau)$  и обеспеченность  $F(h, \tau)$  системы случайных величин  
(средние высоты  $h$  и периоды  $\tau$  смешанного волнения)**

Градации по $\tau$	Параметр	Градации по $h$						
		[0,0; 0,5)	[0,5; 1,0)	[1,0; 1,5)	[1,5; 2,0)	[2,0; 2,5)	[2,5; 3,0)	[3,0; 3,5)
[1, 2)	$p(h, \tau)$	5,6	–	–	–	–	–	–
	$F(h, \tau)$	100,0	–	–	–	–	–	–
[2, 3)	$p(h, \tau)$	26,0	17,5	–	–	–	–	–
	$F(h, \tau)$	94,4	68,4	–	–	–	–	–
[3, 4)	$p(h, \tau)$	0,5	21,5	11,1	–	–	–	–
	$F(h, \tau)$	68,4	50,4	28,9	–	–	–	–
[4, 5)	$p(h, \tau)$	0,0	0,1	6,7	7,3	0,6	–	–
	$F(h, \tau)$	67,9	28,9	17,8	11,2	3,8	–	–
[5, 6)	$p(h, \tau)$	0,0	0,0	0,0	0,1	2,1	0,8	0,1
	$F(h, \tau)$	67,9	28,9	11,2	3,8	3,1	1,1	0,2
[6, 7)	$p(h, \tau)$	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1
	$F(h, \tau)$	67,9	28,9	11,1	3,7	1,1	0,2	0,2

Примечание. «–» в выборке отсутствуют соответствующие значения или их вероятность близка к 0.

Таблица 6

**Квантильные функции высот  $h_p$  и периодов  $\tau_p$  волн**

$p$	$h_p$	$\tau_p$	$p$	$h_p$	$\tau_p$	$p$	$h_p$	$\tau_p$
100 % (min)	0,0	1,0	75 %	0,4	2,4	20 %	1,2	3,9
99 %	0,1	1,6	70 %	0,4	2,5	15 %	1,3	4,1
97 %	0,2	1,8	60 %	0,5	2,7	10 %	1,5	4,3
95 %	0,2	1,9	50 %	0,6	3,0	5 %	1,8	4,7
90 %	0,3	2,1	40 %	0,8	3,2	3 %	2,0	5,0
85 %	0,3	2,2	30 %	0,9	3,5	1 %	2,5	5,4
80 %	0,3	2,3	25 %	1,0	3,7	0 % (max)	4,2	6,8

Таблица 7

**Средние значения и СКО условных распределений периодов волн  $\tau$   
фиксированной высоты  $h$**

Параметр	Градации по $h$								
	[0,0; 0,5)	[0,5; 1,0)	[1,0; 1,5)	[1,5; 2,0)	[2,0; 2,5)	[2,5; 3,0)	[3,0; 3,5)	[3,5; 4,0)	[4,0; 4,5)
$m(\tau h)$	2,34	3,05	3,88	4,52	5,28	5,52	6,18	6,50	6,50
$D(\tau h)$	0,16	0,25	0,23	0,02	0,17	0,02	0,22	0,00	0,00
$\sigma(\tau h)$	0,41	0,50	0,48	0,12	0,41	0,13	0,47	0,00	0,00

**СОВМЕСТНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ВЫСОТ, ПЕРИОДОВ И НАПРАВЛЕНИЙ  
РАСПРОСТРАНЕНИЯ СМЕШАННОГО ВОЛНЕНИЯ И СКОРОСТИ ВЕТРА**

До настоящего времени это распределение  $p(|W|, \varphi, h, \tau, \theta)$  в справочниках не обсуждалось (из-за его пятимерности). Хотя исходные данные позволяют дать его оценку, здесь ответим лишь на следующие вопросы:

- маргинальные распределения  $f(\theta), f(\varphi - \theta)$ ;
- двумерные распределения  $f(h, \theta), f(\theta, \varphi)$ ;
- зависимость распределений ветра и волн.



Средние и максимальные значения высоты ветровых волн и зыби, периодов ветровых волн по сезонам в точках 69° с.ш., 51° в.д. и 70° с.ш., 51° в.д.

Параметр	Период							
	декабрь–февраль		март–май		июнь–август		сентябрь–ноябрь	
	69° с.ш., 51° в.д.	70° с.ш., 51° в.д.	69° с.ш., 51° в.д.	70° с.ш., 51° в.д.	69° с.ш., 51° в.д.	70° с.ш., 51° в.д.	69° с.ш., 51° в.д.	70° с.ш., 51° в.д.
$n$	96245	9624	10304	10304	10304	10304	9704	9704
$\bar{h}_{\text{ВВ}}$	0,5	0,8	0,4	0,5	0,4	0,5	0,5	0,8
$h_{\text{ВВmax}}$	3,3	4,6	2,9	5,0	2,3	5,7	2,9	5,0
$\bar{h}_3$	0,2	0,4	0,2	0,3	0,2	0,3	0,2	0,4
$h_{3\text{max}}$	2,7	4,3	2,3	4,1	1,2	2,2	2,1	3,0
$\bar{\tau}_{\text{ВВ}}$	3,2	4,0	2,8	3,3	2,9	3,3	3,4	4,0
$\tau_{\text{ВВmax}}$	10,5	12,1	10,4	12,2	7,4	11,7	9,3	11,8

Примечания:  $n$  – объем выборки,  $\bar{h}_{\text{ВВ}}$  – средняя высота ветровых волн,  $h_{\text{ВВmax}}$  – максимальная высота ветровых волн,  $\bar{h}_3$  – средняя высота зыби,  $h_{3\text{max}}$  – максимальная высота зыби,  $\bar{\tau}_{\text{ВВ}}$  – средний период ветровых волн,  $\tau_{\text{ВВmax}}$  – максимальный период ветровых волн.

Поскольку поле волн  $\xi(\vec{r}, t)$  зависит от поля ветра  $\vec{W}(\vec{r}, t)$  и в каждый из синоптических сроков  $t$  характеристики  $(\bar{h}, \bar{\tau}, \bar{\theta})$  волнового поля вычисляются по данным  $(|\vec{W}|, \varphi)$  поля ветра, то статистическая зависимость волн от ветра описывается трехмерным распределением

$$p(h, |\vec{W}|, \varphi) = p(h, |\vec{W}| | \varphi) \cdot p(\varphi)$$

в виде произведения условного двухмерного распределения  $p(h, |\vec{W}| | \varphi)$  по румбам на маргинальное распределение  $p(\varphi)$ . Двухмерное распределение  $p(h, \varphi)$  позволяет при заданном  $h$  в поле смешанного волнения через разность  $(\varphi - \theta)$  генерального направления  $\varphi$  ветра (направления распространения ВВ) и направления  $\theta$  распространения СВ оценить наличие зыби в поле СВ.

В табл. 9 приведена зависимость  $p(\varphi)$  и  $p(\theta)$  через совместное распределение  $p(h, \theta)$  и условное распределение  $p(h, |\vec{W}| | \varphi)$  по румбам.

Из таблицы видно, что условные распределения  $p(\varphi | h)$  и  $p(\theta | h)$  различаются по румбам, особенно при SW и W, т.е. здесь явно сказывается присутствие зыби в волновом поле.

В табл. 10 приведена квантильная функция распределения случайной величины  $(\varphi - \theta)$ . Согласно таблице 80 % вероятностный интервал этой разности достигает 40°, хотя медиана распределения близка к 0.

Зависимость высот волн от скорости ветра приведена в табл. 11, в которой даны средние и наибольшие значения, оценки СКО и коэффициенты корреляции между величинами  $\bar{h}$  и  $|\vec{W}|$  по румбам. Статистическая зависимость между волнами и ветром заложена в модели расчета волн по полям ветра в каждый из синоптических сроков, поэтому высокие коэффициенты корреляции вполне объяснимы.

Характеристики ветра в табл. 11 и 3 преемственны. Наиболее интересна в табл. 11 информация о волнах, в частности, распределение средних высот по румбам близко к равномерному с незначительным преобладанием направлений с западной составляющей; наибольшие высоты волн варьируют от 3 до 4 м, СКО варьирует от 0,4 до 0,6 м.

Таблица 9

Зависимость  $p(\varphi)$  и  $p(\theta)$  через совместное распределение  $p(h, \theta)$  и условное распределение  $p(h, |\vec{W}| | \varphi)$  по румбам, %

Параметр	Румбы							
	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
$\varphi   h$	11	10	12	11	12	16	14	13
$\theta   h$	15	12	13	8	10	22	8	10

Таблица 10

Квантильная функция распределения случайной величины  $(\varphi - \theta)$ , градусы

$p$	$(\varphi - \theta)_p$	$p$	$(\varphi - \theta)_p$
90 %	-22,0	40 %	3,0
95 %	-16,0	30 %	7,0
80 %	-13,0	25 %	9,0
75 %	-11,0	20 %	12,0
70 %	-8,0	15 %	15,0
60 %	-5,0	10 %	20,0
50 %	-1,0		

Таблица 11

Зависимость высот волн в Печорском море от скорости ветра по румбам (объем выборки  $N = 125056$  сроков (56 лет), высоты волн в м, модуль скорости ветра в м/с)

Румбы	$h_{cp}$	$h_{max}$	$\sigma_h$	$ W $	$ w _{max}$	$\sigma_{ w }$	$Cor$	$N$
N	0,71	3,8	0,47	7,67	22,7	3,27	0,89	13845
NO	0,67	3,3	0,45	7,57	22,0	3,25	0,92	12864
O	0,69	3,2	0,43	7,95	21,1	3,30	0,93	14591
SO	0,64	3,1	0,40	8,00	23,2	3,34	0,94	13523
S	0,75	4,2	0,49	8,65	28,6	3,72	0,95	15406
SW	0,96	3,9	0,64	9,70	27,0	4,16	0,96	20520
W	0,85	3,8	0,55	9,30	26,6	4,11	0,94	18448
NW	0,79	3,9	0,51	8,43	26,4	3,71	0,91	13859

### ШТОРМА И ОКНА ПОГОДЫ

Синоптическая изменчивость высот волн характеризуется последовательностью импульсов случайного процесса  $x(t)$ , параметризуемых случайными величинами  $\{h^{(+)}, \tau^{(+)}, h^{(-)}, \tau^{(-)}\}$ , описывающими величину  $h$  и продолжительность  $\tau$  шторма (выброса вверх, «+») и окна погоды (выброса вниз, «-») от заданного (например, среднего) уровня  $\bar{h}$  [Рожков и др., 2009].

На рис. 4 приведены временные ряды  $x_p(t)$  квантильных диаграмм (в виде «ящиков с усами») модуля скорости ветра  $|\vec{W}|$  и высот волн  $h$  в 12 точках Печорского моря за промежуток времени октябрь–ноябрь 1954 г. На этом примере поясним специфику использования понятия «выброс» для пространственной области, когда в фиксированный момент времени  $t$  в точках  $(r_j)$  наблюдаются различные значения  $|\vec{W}|_i$  и  $h_i$ . Квантильная функция  $x_p(t)$ , стилизованная образом пяти квантилей  $(x_{min}, x_{0,75}, x_{0,5}, x_{0,25}, x_{max})$  – «ящик с усами» позволяет дать сжатую характеристику пространственно-временного выброса через квантильные трассы.

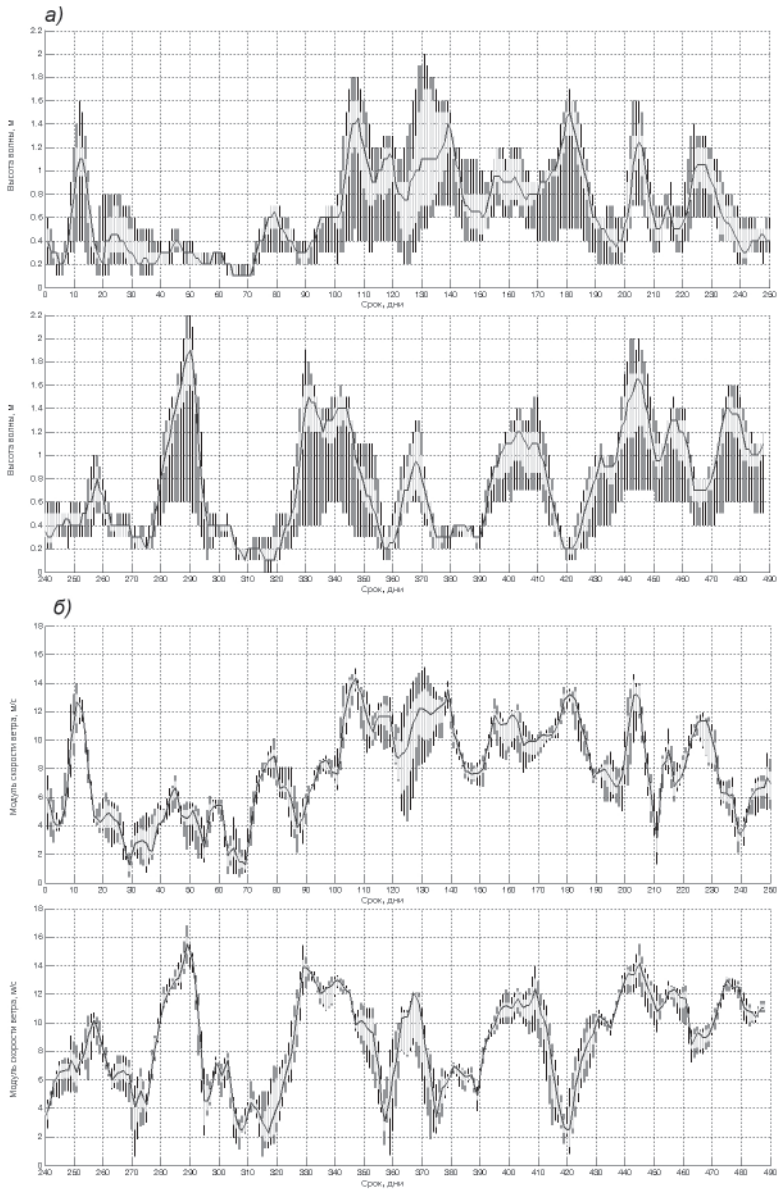


Рис. 4. Временные ряды  $x_p(t)$  квантильных диаграмм модуля скорости ветра  $||$  (а) и высот волн  $h$  в 12 точках Печорского моря за октябрь–ноябрь 1954 г. (черный отрезок – минимум–максимум, серый – квантили  $x_{0,75}$ – $x_{0,25}$ , линия – значения, соответствующие  $x_{0,5}$ ).

Из рис. 4 видно, что верхняя огибающая этих трасс пересекает заданный уровень  $z$  и можно выделить выбросы вверх и вниз, а также определить их параметры  $\{h^{(+)}, \tau^{(+)}, h^{(-)}, \tau^{(-)}\}$ . Если принять за индикатор выброса  $x_{\max(t)}$ , совсем не обязательно, что в шторме  $x_{\min(t)}$  будет выше уровня  $z$ , а  $x_{\min(t)}$  в окне погоды будет «полным штилем».

Порядковые статистики  $|\vec{W}|_i$  и  $h_p$ , их размах  $R$  или интерквартильное расстояние  $Q$  могут быть приняты за индикатор неоднородности поля ветра и волн в заданный

момент времени  $t$ . Система временных рядов – квантильных трасс  $x_p(t)$  в предположении стационарности процесса на фиксированном промежутке времени в терминах выборки  $(x_p^*)_j, j = 1 \dots N$ , где  $N$  – число синоптических сроков в заданном временном интервале, позволяет дать однозначное описание синоптической изменчивости ветра и волн в Печорском море.

В табл. 12 приведена матрица квантильных характеристик пространственно-временной изменчивости поля ветра и волн. По вертикали в этой таблице обозначены квантили  $x_p(t)$  и размах  $R$  пространственного распределения ветра и волн в 12 точках области, по горизонтали – аналогичные характеристики их временного распределения по 488 срокам выборки за октябрь–ноябрь 1954 г. Прокомментируем лишь два (из 25) аспекта, когда:

– за критерий неоднородности полей принят размах пространственного распределения;

– за критерий импульсности полей принято квантильное описание временного распределения заданного квантиля.

1. По пространственному размаху в пределах 12-точечного контура Печорского моря допустимы для ветра значения  $R$  от 1,7 до 2,7 м/с; для волн – от 0,2 до 1,6 м.

Таблица 12

**Квантильные характеристики высот волн (м) и модуля скорости ветра (м/с)**

Квантили по 12 точкам	Квантили высот волн по синоптическим срокам					
	Min	0,75	0,5	0,25	Max	R
Min	0,0	0,2	0,3	0,5	0,7	0,7
0,75	0,1	0,3	0,5	0,8	1,6	1,5
0,5	0,1	0,4	0,6	1,1	1,9	1,8
0,25	0,1	0,4	0,8	1,1	2,0	1,9
Max	0,2	0,5	0,9	1,3	2,2	2,0
R	0,2	0,3	0,6	0,8	1,5	1,3
Квантили по 12 точкам	Квантили модуля скорости ветра по синоптическим срокам					
	Min	0,75	0,5	0,25	Max	R
Min	0,4	4,3	7,2	9,7	14,1	13,7
0,75	0,8	5,1	7,2	10,4	14,8	14,0
0,5	1,3	5,8	8,6	11,2	15,5	14,2
0,25	1,6	6,4	9,2	11,7	16,0	14,4
Max	2,1	6,8	9,6	12,1	16,8	14,7
R	0,7	2,5	2,4	2,4	2,7	1,0

2. Выберем за уровень  $z$  для определения шторма квантиль  $x_{0,25}$  пространственного распределения, его временной размах для ветра равен 14,4 м/с, для волн – 1,9 м; квантиль  $x_{0,25}$  временного распределения имеет значение для ветра 11,7 м/с, для волн 1,1 м. Теперь обозначим это значение из табл. 12 через  $z \equiv x_{0,25;0,25}$ .

Отметим, что в справочнике [Справочные данные..., 2003] предложено многоуровневое определение шторма, табл. 12 дает квантильную интерпретацию этого подхода.

В табл. 13 приведены средние значения, СКО и наибольшие значения параметров  $\{h^{(+)}, \tau^{(+)}, h^{(-)}, \tau^{(-)}\}$ , характеризующих синоптическую изменчивость ветра и волнения.

**Квантили и наибольшие значения параметров  $\{h^{(+)}, \tau^{(+)}, h^{(-)}, \tau^{(-)}\}$ , характеризующих синоптическую изменчивость ветра и волнения**

Квантили	Ветер, м/с				Волны, м			
	$h^{(+)}$	$\tau^{(+)}$	$h^{(-)}$	$\tau^{(-)}$	$h^{(+)}$	$\tau^{(+)}$	$h^{(-)}$	$\tau^{(-)}$
$x_{\min}$	12,2	1	2,1	2	1,4	1	0,2	3
$x_{0,75}$	12,5	5	3,8	3	1,5	3	0,2	7
$x_{0,5}$	13,7	6	9,5	14	1,6	8	0,6	17
$x_{0,25}$	15,0	10	11,2	27	1,9	11	1,1	37
$x_{\max}$	16,8	19	12,0	89	2,2	18	1,3	90
$T$	13,7	6	8,5	14	1,6	8	0,7	20
$Q$	2,5	9	7,4	24	0,4	8	0,9	30
$R$	4,6	18	9,9	87	0,8	17	1,1	87

### ГОДОВАЯ РИТМИКА И МЕЖГОДОВАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ВОЛН И ВЕТРА

На рис. 5 приведены квантильные трассы модуля среднесуточной скорости ветра и высоты волн, вычисленные по многолетней выборке этих величин в календарные сроки безледного периода. Из рисунка видно, что ветру и волнам присуща годовая ритмика и межгодовая изменчивость.

Для аппроксимации этого режимного распределения высот волн в работе [Рожков, Рыбак, 2009] использовано комбинированное распределение

$$F(x, t) = \int_{(\theta)} F(x, \theta_i) f_{\theta^*}(\lambda) d\lambda, \quad (1)$$

где  $\theta$  – векторный параметр,  $f_{\theta^*}(\lambda)$  – плотность распределения значений оценок параметра.

Поскольку годовая ритмика может быть охарактеризована выборками с месячной дискретностью, то для изучения выборочной изменчивости распределений (1) высот волн с учетом их синоптической и сезонной изменчивости создадим ансамбль  $40 \times 12$ -месячных выборок, объемом 220–250 значений каждая. Этот ансамбль аппроксимирован распределением Вейбулла с параметрами  $a$  и  $c$ , зависящими от месяца и года.

Оценки распределения (1) зависят от выборочной изменчивости оценок параметров ( $a$ ,  $c$ ). Предположим, что  $c$  аппроксимируется равномерным распределением с параметрами  $(\alpha, \beta)$ , а  $a$  – нормальным распределением с параметрами  $(\mu, \sigma)$ . Плотности этих распределений имеют вид:

$$u_1(a) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{(y-\mu)^2}{2\sigma^2}\right\}, \quad (2)$$

$$u_2(c) = \frac{1}{\beta-\alpha}. \quad (3)$$

С учётом вышеизложенного режимная функция распределения  $F_h(x, t)$  должна иметь вид комбинированного распределения:

$$F_h(x, t) = \int_{(\theta)} F(x, \theta_i) f_{\theta^*}(\lambda) d\lambda, \quad (4)$$

где  $F(\dots)$  – распределение высот волн,  $\theta$  – векторный параметр,  $f_{\theta^*}(\lambda)$  – плотность распределения значений оценок параметра. Заметим, что распределение такого вида было предложено еще в

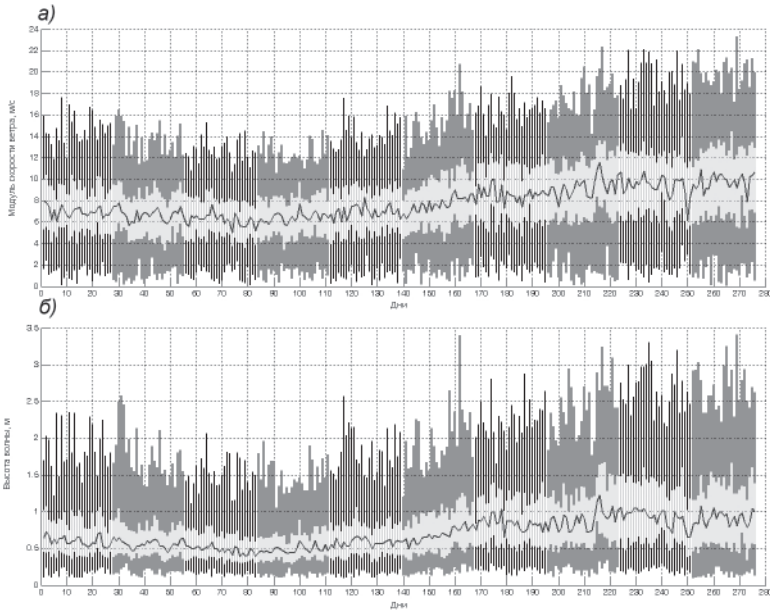


Рис. 5. Квантильные трассы модуля среднесуточной скорости ветра и высоты волн, вычисленные по многолетней выборке в календарные сроки безледного периода (черный отрезок – минимум–максимум, серый – квантили  $x_{0,75} - x_{0,25}$ , линия – значения, соответствующие  $x_{0,5}$ ).

1970-е гг. В последующем оно декларировано во многих публикациях [Давидан и др., 2009], однако для решения конкретных прикладных задач не находило применения.

Режимное распределение (4) необходимо интерпретировать [Рожков, Рыбак, 2009] как среднее значение функции (1) со случайными параметрами ( $a, c$ ).

Представим  $F^*(x, \theta)$  в виде

$$F^*(x, \theta) = F(x, a^*, c^*).$$

С учетом аппроксимаций (2) и (3) распределение (4) при фиксированном  $t$  будет иметь вид:

$$F_h(x, t) = \frac{1}{(\beta_t - \alpha_t) \sigma_t \sqrt{2\pi}} \int_{\alpha_t}^{\beta_t} \int_{\mu_t - 3\sigma_t}^{\mu_t + 3\sigma_t} \exp \left\{ -0.693 \left( \frac{x}{y} \right)^z - \frac{(y - \mu_t)^2}{2\sigma_t^2} \right\} dy dz.$$

### ЭКСТРЕМУМЫ

Модель расчета волн по полям ветра позволяет вычислить средние высоты и периоды волн на промежутке квазистационарности в синоптические сроки, т.е. вопрос о наибольших значениях  $h$  и  $\tau$  на этом промежутке должен решаться, исходя из аппроксимативных распределений элементов волн. Наиболее употребительно в справочниках [Ветер и волны, 1974; Справочные данные..., 2003] семейство распределений Вейбулла – для высот волн с показателем степени 2 (Релей) или 2,1 (Форристон) – для периодов волн – с показателем степени 3 или 4. Это означает, что переход  $x_p = k_p \bar{x}$  от средних значений к квантилям зависит от выбора уровня обеспеченности  $p$ . Для высот волн (распределение Релея) для  $p = 0,03$   $\kappa_p = 2$ ; для  $p = 0,001$  –  $\kappa_p = 3$ ; для периодов волн  $\kappa_p = 2$  при  $p = 0,03$ . Таким образом, если наибольшее значение  $\bar{h}$  в один из сроков достигло 4,2 м, то высота

одной из 1000 волн превысила 12 м. Аналогично, если среднее значение периодов волн достигло 3 с, то три из 100 волн могут иметь период 6 с.

Для вероятностного описания наибольших волн в последовательности (годовой, многолетней) штормов используется в [Справочные данные..., 2003] метод POT (Peak over threshold) – «метод выходов за уровень». В этом методе функция распределения наибольших волн записывается в виде

$$F(h) = \sum_{n=0}^{\infty} [G(h)]^n \cdot p^n,$$

где  $G(h)$  – распределение вероятностей высот волн, превышающих в годовой отрезок времени заданный уровень,  $p^n$  – вероятность превышения в год  $i$  за  $n$  лет заданного уровня. Согласно имеющимся данным в 1954 г. в Печорском море было зарегистрировано 13 штормов со следующими высотами волн:

$i$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
$h$	1,6	1,8	2,0	1,7	1,6	1,4	2,2	1,9	1,4	1,5	2,0	1,5	1,6

В работе [Lopatoukhin et al., 2000] для аппроксимации  $G(h)$  выбрано распределение Вейбулла, а для  $p^n$  – усеченное нормальное распределение.

Наиболее часто межгодовая изменчивость высот волн описывается в терминах метода годовых максимумов AMS (Annual maximal series). В этом методе рассматривается распределение крайних членов  $h_{\max}$  ранжированной выборки годовой продолжительности по результатам расчета волн по полям ветра за  $n$  лет. Для Печорского моря такая выборка представлена в табл. 14.

Для исходных распределений экспоненциального типа (нормальное, логнормальное, Вейбулла) распределение крайних членов выборок сходится к двойному экспоненциальному распределению

$$F(x) = \exp\left(-\exp[-a(x-b)]\right), \quad (5)$$

где  $a, b$  – параметры. На рис. 6 приведен биplot, подтверждающий допустимость принятия аппроксимации (5) для данных табл. 14.

В работе [Lopatoukhin et al., 2000] предложен метод квантильной функции (МКФ) для оценивания экстремумов высот волн с учетом их синоптической, сезонной и межгодовой изменчивости. Этот метод базируется на анализе  $n$  выборок сильных штормов в году  $i$  за  $T$  лет. При  $n = 1$  (один шторм в год) этот метод аналогичен методу AMS, при  $n \geq 1$  он обобщает метод POT.

Таблица 14

**Годовые максимумы высот волн для Печорского моря**

Год	$h_{\max}$	Год	$h_{\max}$	Год	$h_{\max}$	Год	$h_{\max}$	Год	$h_{\max}$	Год	$h_{\max}$
1949	3,8	1959	3,2	1969	2,5	1979	2,9	1989	3,4	1999	2,8
1950	2,4	1960	2,9	1970	3,6	1980	3,4	1990	3,4	2000	2,9
1951	3,1	1961	2,9	1971	3,7	1981	3,7	1991	2,9	2001	2,6
1952	2,3	1962	3,2	1972	3,3	1982	3,8	1992	3,4	2002	3,4
1953	2,6	1963	3,2	1973	3,2	1983	3,1	1993	3,4	2003	3,3
1954	3,3	1964	4,2	1974	3,4	1984	3,0	1994	3,2	2004	2,9
1955	3,1	1965	2,8	1975	3,7	1985	2,7	1995	3,9	2005	2,9
1956	3,0	1966	3,8	1976	2,9	1986	2,8	1996	3,4		
1957	3,0	1967	3,7	1977	2,7	1987	2,9	1997	3,7		
1958	2,6	1968	3,7	1978	3,3	1988	2,9	1998	3,2		

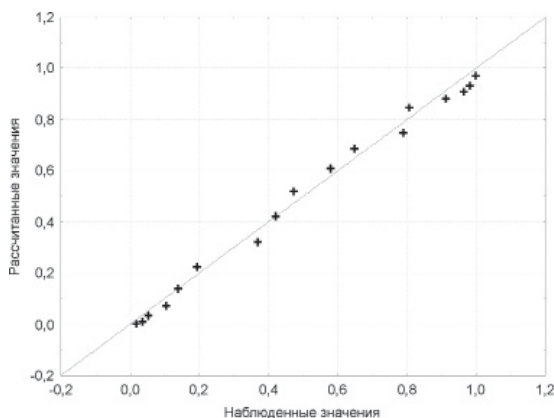


Рис. 6. Биплот годовых максимумов высоты волны за период наблюдений с 1949 по 2005 г. в Печорском море.

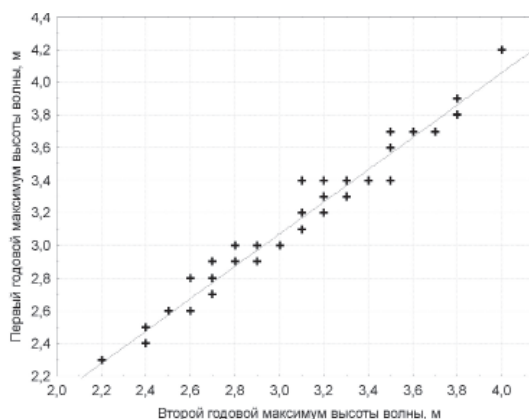


Рис. 7. Точечная диаграмма первых и вторых годовых максимумов высот волн за период наблюдений с 1949 по 2005 г. в Печорском море.

Порядковые статистики  $h_{ij}$  являются оценками квантилей распределения

$$G(x_1, \dots, x_n) = P\{h_{i1}^+ \leq x_1, \dots, h_{in}^+ \leq x_n\}.$$

На рис. 7 приведена точечная диаграмма первых и вторых годовых максимумов высот волн в Печорском море. Из рисунка легко сделать вывод, что связность этих величин настраивает читателя на необходимость с осторожностью относиться к терминам «высоты волн, возможные 1 раз за  $n$  лет».

## ВЫВОДЫ

1. Имеющаяся информационная база по ветру  $\vec{W}(\vec{r}, t)$ , волнам  $\zeta(\vec{r}, t)$  и границам распространения льда  $\xi(\vec{r}, t)$  дает возможность детализировать и дополнить режимные характеристики, приведенные в справочниках [Ветер и волны, 1974; Справочные данные..., 2003; Дементьев и др., 2009], однако эту базу необходимо дополнить результатами расчетов волн за последние годы.

2. Параметрическая модель позволяет дополнить обычно используемые в справочниках средние характеристики смешанного волнения  $(\bar{h}, \bar{\tau}, \bar{\theta})$ , оценками вклада в волновое поле систем ветрового волнения и зыби. Использование в подготавливаемом справочнике



сведений о спектральной структуре  $S_c(\omega, \theta, \vec{r}, t)$  волнового поля дискуссионно: с одной стороны, эта характеристика существенно дополняет средние характеристики  $(\bar{h}, \bar{\tau}, \bar{\theta})$ , но, с другой стороны, требует наличия у потребителя опыта работы со спектрами волн; и, кроме того, из-за недостаточного знания правой части уравнения баланса волновой энергии, имеются существенные расхождения между моделями различных авторов.

3. Поля ветра и волн имеют синоптическую изменчивость, описываемую теорией импульсных случайных процессов в терминах выбросов траекторий: выше (шторм) и ниже (окно погоды) заданного уровня. Синоптическая изменчивость подвержена сезонной и межгодовой модуляции, которая описывается в терминах периодически коррелированных случайных процессов (ПКСП).

4. Наличие архивов границ распространения льда, метеорологических полей и моделей расчета волн по полям ветра позволяет:

- реконструировать любую из уже прошедших ситуаций,
- сделать статистический анализ всего накопленного архива данных, но потребителя интересует не то, что было, а то, что может быть.

Таким образом, весь многолетний массив данных по льду, ветру и волнению необходимо использовать для построения вероятностной модели, позволяющей создать гипотетический ансамбль реализаций и по нему оценить риск действий в заданной ситуации.

*Работа выполнена при поддержке федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бузин И.В., Зубакин Г.К. Сезонная изменчивость региональной климатической системы (РКС) Баренцева моря // Труды ААНИИ. Т. 450. 2009. С. 41–58.
- Ветер и волны в океанах и морях / Ред. И.Н.Давидан, Л.И.Лопатухин, В.А.Рожков. Регистр СССР. Л.: «Транспорт», 1974. 359 с.
- Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Баренцево море. Вып. 1. Л.: Гидрометеиздат, 1990. 280 с.
- Давидан И.Н., Давидан Г.И., Дымов В.И., Пасечник Т.А. Спектрально-параметрическая модель ветрового волнения и ее преимущества при решении прикладных задач // Изв. РГО. 2009. Т. 141. Вып. 2. С. 11–23.
- Давидан И.Н., Рожков В.А. и др. Анализ ансамбля гидрометеорологических полей методами теории стохастических дифференциальных уравнений // Изв. РГО. 2009. Т. 141. Вып. 2. С. 11–23.
- Давидан И.Н., Рожков В.А. и др. Вероятностный анализ пространственно-временной изменчивости полей волн // Труды ГОИН. 2002. Вып. 208. С. 293–313.
- Давидан И.Н., Рожков В.А. и др. Синоптическая изменчивость и пространственная неоднородность полей ветра и волнения в Балтийском море // Изв. РГО. 2011. Т. 143. Вып. 6. С. 6–22.
- Дементьев А.А. и др. Климат бассейна Печоры. СПб.: ААНИИ, 2009. 160 с.
- Драган Я.П., Рожков В.А., Яворский И.Н. Методы вероятностного анализа ритмики океанологических процессов. Л.: Гимиз, 1987. 319 с.
- Зубакин Г.К. Взаимодействие ветровых волн с ледяным покровом // Проблемы Арктики и Антарктики. 1977. Вып. 52. С. 70–75.
- Зубакин Г.К. Расчет элементов ветровых волн в море, покрытом битым льдом // Труды ГМЦ СССР. 1976. Вып. 164. С. 20–26.

Зубакин Г.К., Бузин И.В. Характеристика многолетних изменений параметров климатической системы Баренцево-морского региона и возможный механизм ее развития // Труды ААНИИ. Т. 450. 2009. С. 59–80.

Иванов Н.Е., Рожков В.А. Компонентное описание ритмики гидрометеорологических процессов // Вестник СПб Университета. 1996. Сер. 7. Вып. 2. С. 66–74.

Рожков В.А. и др. Методы и средства статистической обработки и анализа информации об обстановке в Мировом океане на примере гидрометеорологии. Обнинск: ВНИИГМИ-МЦД, 2009. 416 с.

Рожков В.А., Рыбак О.О. Статистическое разнообразие режимных распределений высот волн // Изв. РГО. 2009. Т. 141. Вып. 6. С. 25–32.

Справочные данные по режиму ветра и волнения Баренцева, Охотского и Каспийского морей / Ред. Л.И.Лопатухин, А.В.Бухановский, А.Б.Дегтярев, В.А.Рожков. СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2003. 213 с.

Kalnay E. et al. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project // Bulletin of the American Meteorological Society. 1996. Vol. 77. № 3. P. 437–471.

Lopatoukhin L.J., Roshkov V.A., Ryabinin V.R., Swail V.R. Estimation of extreme wind wave heights // WMO/TD-N 1041. JCOMM Technical Report № 9. 2000. 73 p.

*V.I.DYMOV, G.K.ZUBAKIN, YU.P.KLERVANTSOV, V.A.ROZHKOV, E.A.SKUTINA*

## **WIND AND SEA WAVES IN THE PECHORA SEA**

*The discussion questions of the handbook contents and structure of the wind and sea waves regime in the Pechora Sea are considered. The multivariate statistical analysis of the wind and sea waves fields ensemble was the foundation of speculation, and this ensemble has been obtained by the model computation of wave spectrum by reanalysis of wind velocity fields in 1949–2005.*

*Keywords:* ice margin, ice edge, wind velocity vector; heights and periods of waves; directions of propagation of wind-induced waves, waves of mixed origin and ripples; synoptic, seasonal and from-year-to-year variability of waves and wind.