

Анализ наблюдаемых данных

УДК 551.466.3:004.925.8(261.243)

© А.В. Бухановский¹, Л.И. Лопатухин^{1, 2}, 2011

¹Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики

²Санкт-Петербургский государственный университет
leonid-lop@yandex.ru

ЭКСТРЕМАЛЬНЫЕ И НЕОБЫЧНЫЕ ВЕТРОВЫЕ ВОЛНЫ: ИЗМЕРЕНИЯ, РАСЧЕТ, ПРОГНОЗ

Рассмотрено волнение, вызванное ветром. Обсуждаются различия между экстремальными и необычными волнами. Указано, что не всякая большая волна является необычной (freak или rogue). Такая волна должна обладать набором определенных свойств и следовательно, может рассматриваться как многомерная случайная величина. Обобщение натурных данных позволило оценить вероятность появления необычной волны. Резкое изменение спектральной структуры волнения является одним из методов прогноза (предупреждения) возможности появления необычной волны.

Ключевые слова: ветровые волны экстремальные и необычные, повторяемость, расчет, прогноз, климатические спектры.

Ветровое волнение (ВВ), обусловленное воздействием турбулентного воздушного потока на водную поверхность, является вероятностным гидродинамическим процессом [1]. Это означает, что ВВ как вероятностный процесс (а точнее, случайное поле) описывается частотно направленной спектральной плотностью $S(\omega, \Theta, \vec{r}, t)$, зависящей от пространственных координат $\vec{r}$ и времени t . Как гидродинамический процесс ВВ подчиняется законам сохранения количества движения (импульса) и массы (неразрывность сплошной среды). Под термином «ветровое волнение» понимают ветровые волны (находящиеся под непосредственным воздействием ветра), зыбь (волнение, оставшееся после прекращения действия ветра или волны, пришедшие из другого района), смешанное волнение (одновременно существующие ветровые волны и зыбь). При решении ряда прикладных задач удобно интерпретировать волну в терминах выбросов случайных процессов: каждой индивидуальной волне ставится в соответствие многомерная случайная величина (МСВ) $X = \{h, \tau, \lambda\}$, где h – высота волны, τ – период, λ – длина волны; спектральная плотность $S(\omega, \Theta, \vec{r}, t)$ описывается в терминах импульсных случайных процессов через параметризацию $S(\omega, \Theta, m_X(\vec{r}, t))$, где m_X – моменты распределения МСВ X . Определяемые таким образом ветровые волны можно называть обычными, так как на промежутке квазистационарности (20–30 мин) и за длительные промежутки времени МСВ подчинена многомерному закону распределения, а эволюция $S(\omega, \Theta, \vec{r}, t)$ описывается уравнением волновой энергии в спектральной форме.

Проблема оценки экстремальных (наибольших) высот волн в мировом океане существует столь же долго, сколько человек использует океаны и моря. Оценки наибольших высот волн изменялись от огромных 50-метровых левиафанов до скромных 6–7-метровых. Проблема достоверных оценок наибольших волн стала особенно актуальной в последние 25–30 лет, что связано с началом активного освоения ресурсов океанов. В отличие от судов, способных обойти зону сильного волнения, сооружения не могут пере-

мещаться и вынуждены противостоять любым штормовым условиям. В разработке методов оценки экстремальных волн за последние годы достигнуты значительные успехи. Достаточно подробный обзор существующих подходов опубликован Всемирной метеорологической организацией (ВМО) [2]. В настоящее время в основном ясно, как оценивать высоту волны, возможную не только раз в 5, 10, 25, 50 или 100 лет, но даже один раз в 1000 лет [3–6].

Известно, что высота волн в океанах и морях может достигать почти 30 м. Например, в Баренцевом море один раз в 100 лет может встретиться волна высотой 24 м [3]. В Северном море аналогичная волна оценивается в 30 м [5]. Такие оценки использованы при проектировании буровых установок в конкретных районах океанов и морей и частично включены в соответствующие правила и нормы.

Регистрация необычных волн. Большие волны в мировом океане, как правило, не представляют принципиальной опасности для мореплавания из-за малой крутизны. Однако среди экстремальных волн встречаются волны, параметры которых не соответствуют общепринятым представлениям о форме ветровых волн, не описаны в общепринятых нормативных документах и не объясняются в рамках традиционных подходов. О таких волнах известно по авариям судов и сооружений, из информации предоставляемой судоводителями, а в последние годы и по измерениям с помощью различных приборов. Это так называемые необычные (ненормальные) волны (*freak / rogue waves* – англ.) или даже волны-убийцы. К районам возможного появления таких волн традиционно относили акваторию у юго-восточного побережья Африки (см.: «Волны, несущие гибель» в [7]). В 1970-е годы имелось достаточно публикаций, посвященных таким волнам. Здесь произошли крупные аварии с судами различного класса, а необычные волны имеют свое местное название – «кэйпроллеры». Проведение регулярных измерений волнения (так называемый волновой мониторинг) показало возможность образования необычных волн на других акваториях, в частности на Черном море. Здесь, недалеко от Новороссийска, регулярно (каждые шесть часов) измерялось волнение. С июля 1996 г. получено свыше 15 тыс. записей волнения продолжительностью 20 мин. каждая. Число зарегистрированных волн составляет почти 4 млн. За время работы волномерного буя было зарегистрировано три необычные волны (16 декабря 2000 г., а также 22 и 24 ноября 2001 г.). Их максимальная высота соответственно равна 9.2, 10.3 и 5.7 м, относительная высота $h_{\max} / h_s$ находится в диапазоне 2.7–4.2 (следовательно, $h / \bar{h} - 4.3-6.7$), высота гребня $c / h > 0.7$, а высота волн h^+, h^- непосредственно перед и после необычной волны составляла всего 1/3 высоты необычной волны. Описание этого уникального для России эксперимента и ситуации при регистрации необычных волн, можно найти в работах [8–10]. Фрагмент записи с необычной волной приведен на рис. 1.

Анализ спектральных характеристик волнения для указанных трех реализаций показал, что спектры не отражают факта наличия необычных волн – ситуация со спектром произвольной конфигурации. Например, в 2000 г. спектральная плотность ветровых волн характеризовалась одним пиком, а для 2001 г. – характерны многопиковые спектральные плотности смешанного волнения. Целесообразно отметить, что этим же бумом в феврале 2003 г. была зарегистрирована волна высотой 12.3 м (период – 10.3 с) при средней высоте в 4.3 (период 8.9 с), т.е. выше, чем необычные волны в указанных случаях [11]. Однако форма этой волны не представляла ничего необычного. В последние годы наиболее известным примером регистрации необычной волны является «новогодняя волна», зарегистрированная на нефтяной платформе «Дропнер» компании Экофиск (56°5' с.ш., 3°2' в.д.) в Северном море 1 января 1995 г. Этот эксперимент и анализ записи волнения подробно описаны в многочисленных статьях на русском и английском

языках. Отметим только, что высота необычной волны составила 25.6 м, $c/h = 0.72$, $h_{\max}/h_s = 2.15$.

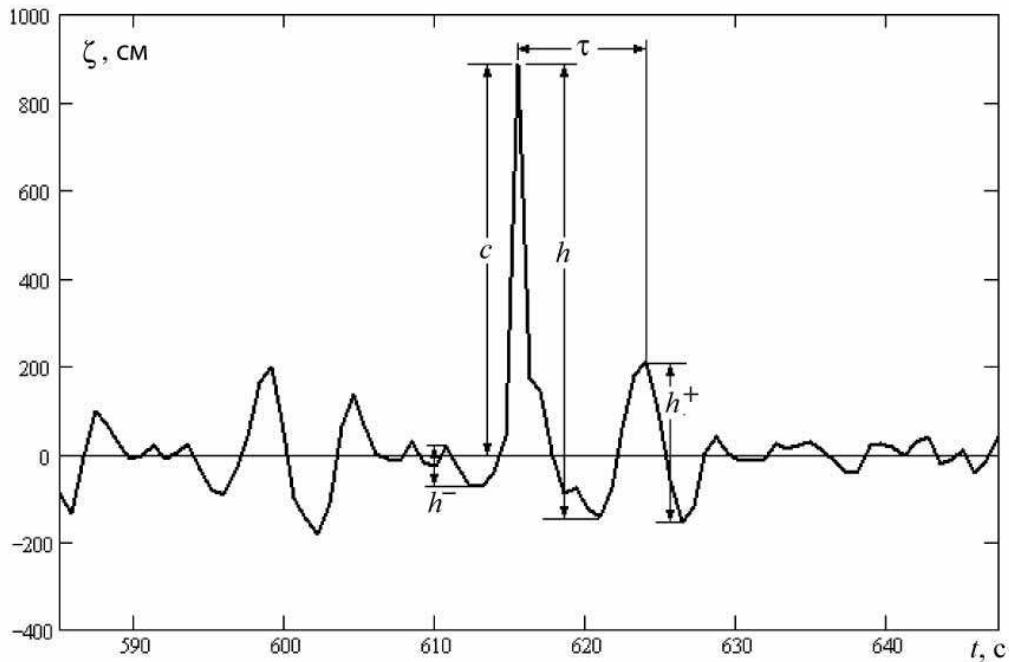


Рис. 1. Отрезок реализации, содержащий необычную волну с параметрами (h, c, τ, h^-, h^+). Черное море, 16 декабря 2000 г.

Причины образования необычных волн. Имеются многочисленные попытки объяснить причины возникновения необычных волн и обозначить районы их наиболее частого появления. В 1970-х годах образование необычных волн связывали с наличием встречного течения (в частности, для акватории юго-восточного побережья Африки). Не исключалось образование таких волн на других акваториях с сильными течениями, в частности в районе интенсификации течения Гольфстрим, на приливных течениях о.Медвежий в Баренцевом море, и т.п. Не исключалось образование необычных волн в районах резких изменений глубин, где возможна многократная волновая рефракция [12]. Результаты последних исследований показали, что встреча с необычной волной возможна в любой точке мирового океана.

Причины генерации необычной волны можно разделить на две большие группы – внешние и внутренние. В табл. 1 обобщены возможные причины образования необычных волн. Из таблицы следует, что к внутренним причинам относят явления, связанные со спецификой распространения ветровых волн, обладающих свойством дисперсии (зависимость фазовой скорости от частоты). К внешним причинам относятся гидрометеорологические и топографические причины. Например, для наиболее известного и опасного района у юго-восточного побережья Африки характерно наличие сильного волнения южных румбов, встречного течения со скоростью до 5 уз, резкого свала глубин. Внешние факторы обуславливают также рефракцию волн на мелководье с последующим образованием стоячей необычной волны.

Например, по записям волнения в Черном море на основе нелинейного уравнения Шредингера объяснен эффект возникновения необычной волны через суперпозицию нескольких интенсивных волновых групп с различными скоростями, взаимодействующих с фоновым волнением, что приводит к возникновению солитона огибающей волнового

процесса [8]. При этом сама необычная волна, несмотря на возможные аналогии, солитонем не является; масштабы ее существования ограничиваются несколькими секундами. В декабре 2000 г. в Черном море волна сформировалась почти внезапно и на ограниченном пространстве примерно в течение 5 с. Новогодняя волна в Северном море образовалась в результате взаимодействия интенсивных волновых групп с различными скоростями, а на Черном море необычная волна связана в основном с дисперсионным сжатием (сжатием) групп малоамплитудных волн. Чрезвычайно важно, что необычная волна может образоваться в течение нескольких десятков секунд, примерно столько же времени просуществовать и затем обрушиться. Поэтому сведения о необычных волнах «шатунах», которые якобы гуляют по просторам океанов и морей, являются не более чем мифами. Следовательно, спрогнозировать точное место и время появления необычной волны невозможно, можно только говорить об оценке вероятности ее появления. Некоторые внешние условия способствуют повышению вероятности образования необычной волны. Например, – переходные процессы в волновом поле, вызванные быстрой сменой условий волнообразования. Так, гибель судна «Аурелия» (класс Российского морского регистра судоходства, дедвейт 34 тыс.т) 2 февраля 2005 г. в Тихом океане (юго-восточнее Японии) произошла при прохождении атмосферного фронта с сочетанием ветровых волн и зыби [6]. Для мореплавателей прогноз повышения вероятности образования необычной волны – разумно формулироваться в вероятностных терминах. Допустимо также добавлять рекомендации, (как это делается в прогнозах по юго-восточному побережью Африки), по выбору маршрута следования («избегайте стрессных течения», «отойдите со свала глубин», «на встречном волнении сбавьте скорость» и т.п.). Кроме того, в связи с отсутствием единого определения необычной волны было бы полезным ввести категории необычности волны (по аналогии с существующей классификацией тропических циклонов).

Таблица 1

Основные причины образования необычных волн

Внешние	Внутренние
Взаимодействие волн с встречным течением	Частотная модуляция случайной волновой поверхности
Фокусировка групп волн и их взаимодействие	Генерация частотно-модулированных волновых пакетов. Частотная модуляция больше, чем амплитудная, приводит к усилению необычных волн
Рефракция вокруг мелководий (банок) или над наклонным дном	Совместный эффект волновых взаимодействий четвертого и пятого порядков
Волновая каустика из-за дифракции за островами и полуостровами	Нелинейность более чем третьего порядка
Крутые волны при развивающемся волнении, особенно при усилении ветра	Пространственно-временная фокусировка, нелинейная фокусировка (неустойчивость Бенджамина-Фейра)
Пересечение волнения от различных направлений и (или) противоположные системы волн	Одновременный приход нескольких гребней в одну точку
Естественные колебания энергии волн с периодом более 20 мин	Влияние углового распределения волн

Статистика необычных волн. В ряде публикаций допускалось, что необычной волной является любая волна с высотой $h \geq 2h_s$ в выборке. Тогда при допущении квазистационарности и релеевского распределения высоты волн такой волной может быть каждая из 3000. При среднем периоде волн 10 с необычная волна будет встречаться каждые восемь часов. Следовательно, критерий $h \geq 2h_s$ является слишком слабым условием,

поскольку такие волны перестают быть необычными. Необычность волны формализуется набором критериев [13], некоторые из них формулируются следующим образом:

- относительная высота волны $h/h_s > 2.4$, где h_s – значительная высота волнения (или $h/\bar{h} > 3.8$, где $\bar{h}$ – средняя высота волнения);
- высота гребня волны $c > 0.65h$;
- безразмерная крутизна $\delta = (g\tau^2 / 2\pi h) > 0.5$;
- высота волны существенно превышает высоты h^+ и h^- соседних волн, т.е. $h > 2h^+$, $h > 2h^-$;
- глубокая ложбина перед волной.

Таким образом, в смысле параметризации необычная волна должна рассматриваться как некоторый случайный импульс (с параметрами $\Xi = (h, c, \delta, h^+, h^-, \dots)$ редкой повторяемости в последовательности обычных ветровых волн. Обобщенная схема выделения необычной волны из всей выборочной совокупности высот волн показана на рис. 2.

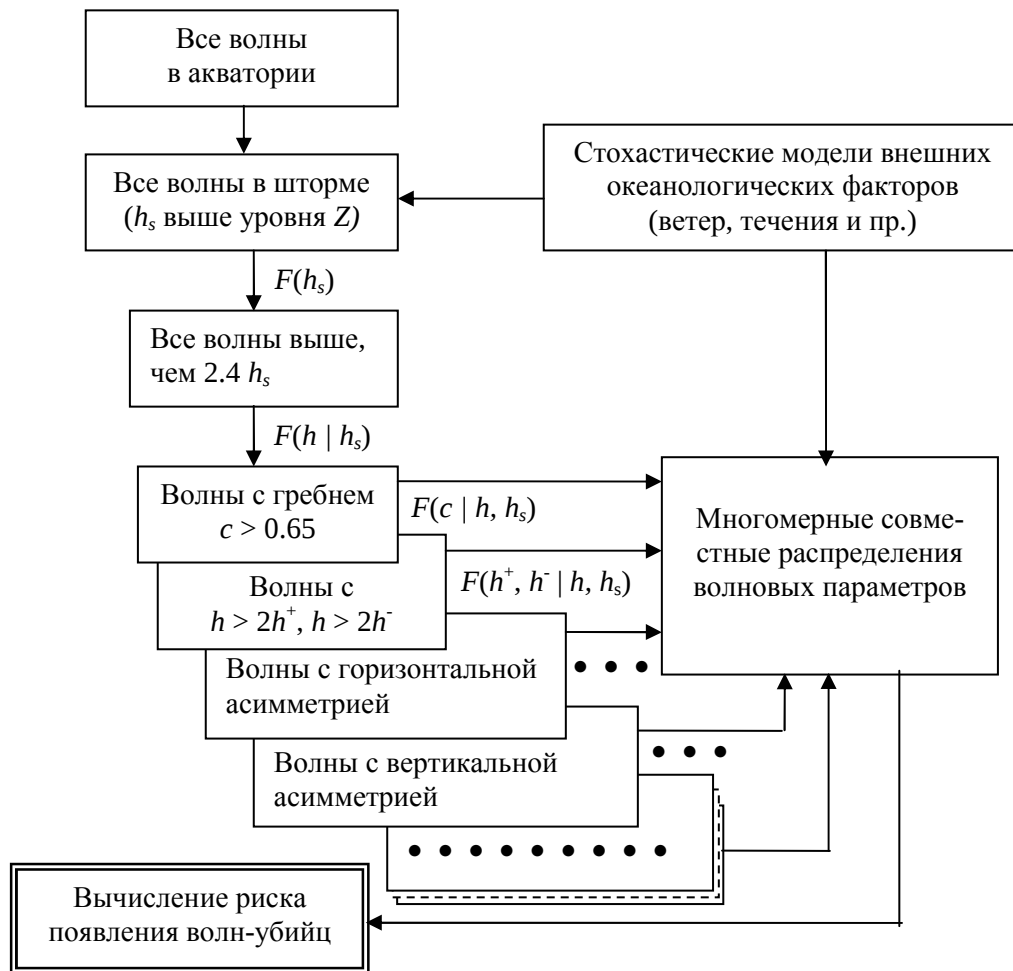


Рис. 2. Последовательность условий, необходимых для отнесения волны к семейству необычных волн.

Статистику необычных волн допустимо анализировать в терминах модели «засорения» выборки, тогда выборка высот волн является смесью обычных и необычных импульсов. Следовательно, распределение элементов волн представимо в виде

$$\Phi_{\Xi}(X) = (1 - \varepsilon)F_{\Xi}(X) + \varepsilon\hat{F}_{\Xi}(X), \quad (1)$$

где $F_{\Xi}(X)$ – совместное распределение параметров $\Xi = (h, c, \delta)$ всех обычных волн, а $\hat{F}_{\Xi}(X)$ – асимптотическое распределение параметров, характеризующих форму необычных волн как многомерных экстремумов выборки.

Анализ имеющихся данных показывает, что два распределения Релея с различными параметрами могут быть использованы в распределении (1). Первый член является распределением всех волн (закон Релея с $h/\bar{h} = 1.0$); второй член характеризует засорение фона из-за наличия необычной волны и описывает распределение необычных волн с некоторым средним значением. Величина ε определяет вероятность появления этих волн на промежутке квазистационарности. Некоторое пояснение дается на рис. 3.

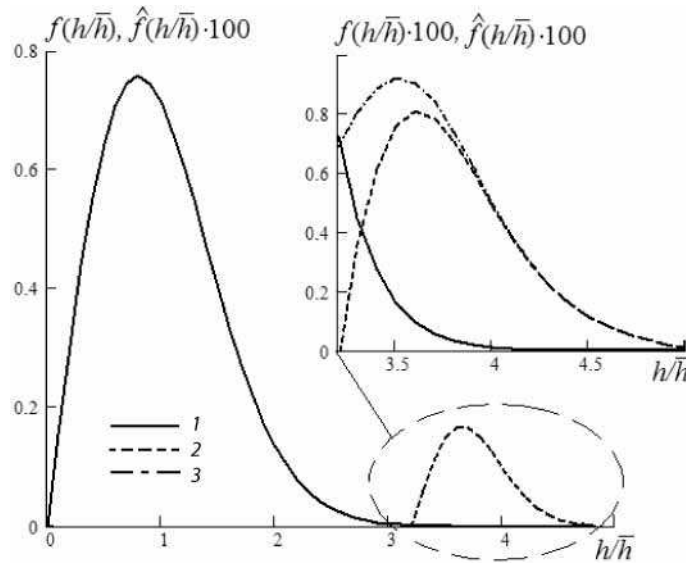


Рис. 3. «Засоренное» распределение высоты волн.

1 – распределение обычных волн; 2 – распределение необычных волн (умноженное на 100);
3 – совместное распределение необычных и обычных волн.

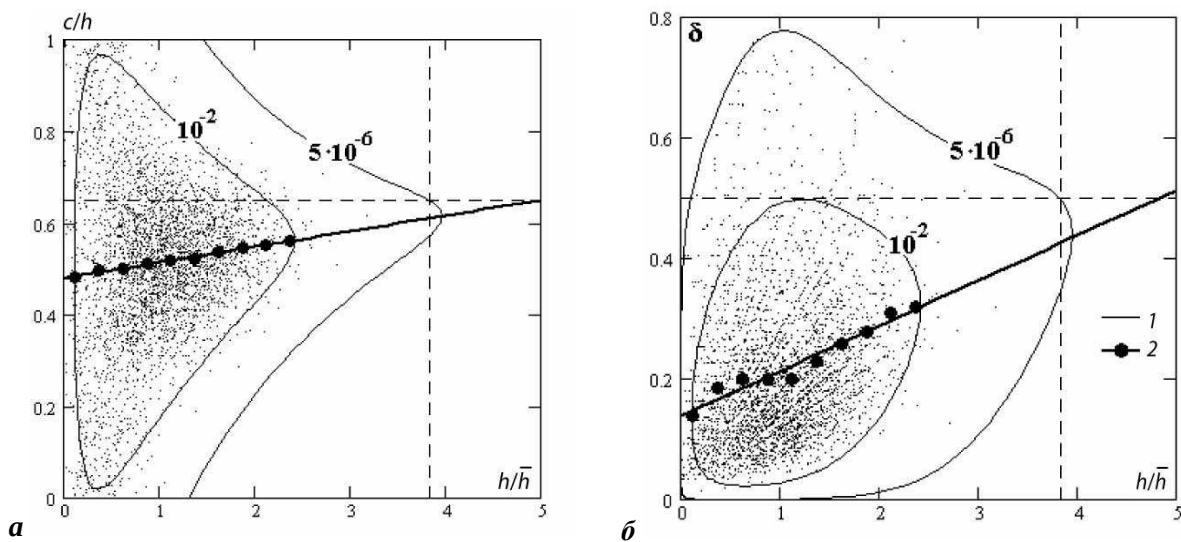


Рис. 4. Совместное распределение безразмерных параметров $\{h, c/h\}$ (а) и $\{h, \delta\}$ (б) по обобщенным измерениям штормового волнения.

1 – контур заданной обеспеченности; 2 – условные регрессии.

Совместное распределение $F_h(x_1)F_{c/h}(x_2|x_1)$ и $F_h(x_1)F_{\delta/h}(x_3|x_1)$ представлено на рис. 4. Этот рисунок обобщает около 5000 записей волн, но без необычной волны. На нем показана линия равных вероятностей (Р %) для значений $\{h, c/h\}$ и $\{h, \delta\}$. Из рисунка видно, что значение $\{h/\bar{h} \geq 3.8, c/h \geq 0.65\}$ при любом δ и $\{h/\bar{h} \geq 3.8, \delta \geq 0.5\}$ при любом c/h имеют обеспеченность $5 \cdot 10^{-6}$. Вероятность P определяется как $P\{\delta \geq 0.5 | h/\bar{h} \geq 3.8 \cap c/h \geq 0.65\} = 0.12$. Это означает, что обеспеченность совместного распределения трех условий $\{h/\bar{h} \geq 3.8, c/h \geq 0.65, \delta \geq 0.5\}$ составляет $5 \cdot 10^{-6} \cdot 0.12 = 6 \cdot 10^{-7}$. Следовательно, только одна волна из 1.7 млн может быть с высотой больше $3.8\bar{h}$, гребнем больше, чем $0.65h$, и крутизной $\delta > 0.5$. Эту величину можно принять за нижнюю границу для оценки вероятности. Если допустить, что промежуток квазистационарности содержит примерно 1000 волн, то необычная волна может появиться в одной из 1660 реализаций по тысяче волн.

Рассмотренные оценки характеризуют внутренние факторы, обуславливающие возникновение ВУ, т.е. особенности волнения на промежутке квазистационарности. Этот процесс, в свою очередь, модулируется внешними факторами, связанными с синоптической изменчивостью условий волнообразования. Тогда вероятностная модель (1) обобщается с учетом изменчивости внешних факторов в форме комбинированного распределения:

$$\tilde{\Phi}_{\Xi}(X) = \int_{\langle \Omega \rangle} \Phi_{\Xi}(X, \bar{X}) \varphi(\bar{X}) d\bar{X} = (1 - \varepsilon) \int_{\langle \Omega \rangle} F_{\Xi}(X, \bar{X}) \varphi(\bar{X}) d\bar{X} + \varepsilon \int_{\langle \Omega \rangle} \hat{F}_{\Xi}(X, \bar{X}) \varphi(\bar{X}) d\bar{X}. \quad (2)$$

Здесь $\tilde{\Phi}_{\Xi}$ – функция распределения элементов $\Xi = (h, c, \delta)$ всех индивидуальных волн с учетом их синоптической, сезонной и межгодовой изменчивости, а $\varphi(\bar{X})$ – режимная плотность распределения параметров $\bar{X}$, соответствующая определенному интервалу квазистационарности и участку квазиоднородности.

Первое слагаемое в (2) задает комбинированное распределение всех обычных волн, а второе – комбинированное распределение всех необычных волн. Если выразить зависимость $\bar{X} = \bar{X}(t)$ и рассматривать интегрирование в (2) за T -летний интервал, то можно оценить вероятность регистрации необычной волны заданной высоты в различных районах Мирового океана или связанную с ней характеристику – среднее число необычных волн за интервал времени. Например, в юго-восточной части Баренцева моря один раз в 100 лет может быть: 20 необычных волн высотой более 10 м, 6 необычных волн выше 15 м и всего одна необычная волна – выше 22 м. По данным [3], наибольшая высота **обычной** индивидуальной волны (0.1 % обеспеченности), возможной один раз в 100 лет в этом районе, составляет 29.2 м, т.е. существенно больше. Таким образом, в режимном ансамбле необычная волна необязательно появляется в самых сильных штормах, хотя на интервале квазистационарности для не самых сильных штормов необычная волна является наибольшей. Потому оценка повторяемости необычной волны $\varepsilon = 6 \cdot 10^{-7}$ только на интервале квазистационарности не определяет степень риска при встрече с ней. Иными словами, при определенном сочетании внешних факторов вероятность встречи с необычной волной возрастает, хотя эти факторы не всегда связаны с интенсивностью волнового фона.

Очевидно, вероятность встретить необычную волну в любой точке моря выше, чем в фиксированной точке.

Необычная волна и ее пространственная форма. В реальности любая волна имеет минимум три характеристики: высоту, длину и длину гребня. Последний параметр в среднем в 3 раза больше, чем длина волны. Это условие формально не важно для практических исследований, так как суда и буровые установки являются точечным объектом по сравнению с волной. Измерений трехмерных волн крайне мало, каждое измерение уникально. Наиболее объективной регистрацией этих волн является стереофотографическая съемка. Такие измерения дорогостоящие и в настоящее время практически не выполняются. Известно несколько уникальных проектов шестидесятых годов – SWOP (Stereo Wave Observation Project — проект стереофотосъемки волн) в США [13] и в России [1]. На рис. 5 и 6 показан результат уникального измерения волн в южной части Тихого океана, недалеко от Антарктиды в апреле 1956 г. [14]. Эти данные интересны тем, что была зафиксирована волна высотой 24.9 м (до недавнего времени самая высокая волна, измеренная в мировом океане). Более того, эта волна может считаться необычной по некоторым сочетаниям параметров.

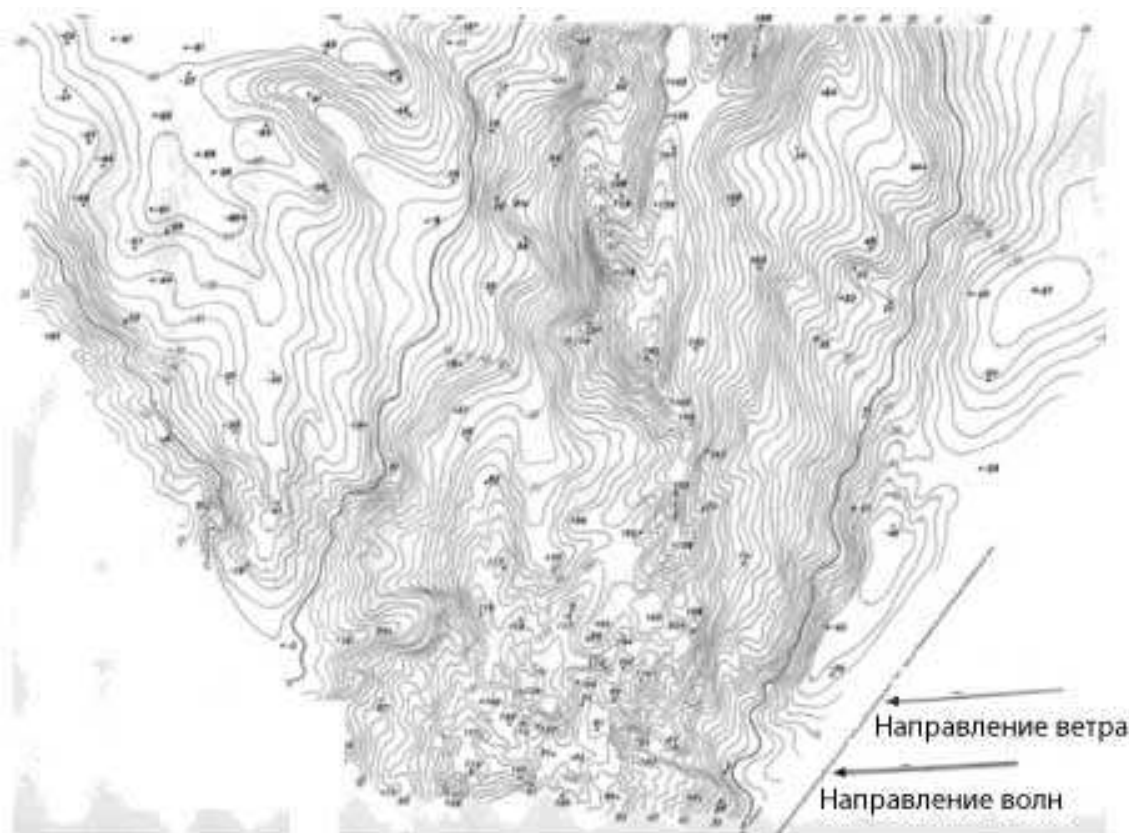


Рис. 5. Трехмерная волна (волновой холм).
Тихий океан, район вблизи Антарктиды, апрель 1956 г.
Параметры: $h = 24.9$ м, $\lambda = 349$ м.

На рис. 5 и 6 видны некоторые интересные детали волны:

- волна имеет вертикальную асимметрию. Высота волны 24.9 м, высота гребня 18.2 м, т.е. $(c/h) = 0.73$ (по этому параметру волну можно классифицировать как необычную);
- волна горизонтально симметрична: подветренный и наветренный склоны почти равны (172 и 182 м) (по этому параметру волна не является необычной);
- гребень волны имеет два холма с незначительной впадиной между ними;
- длина гребня в 2 раза меньше, чем длина волны.

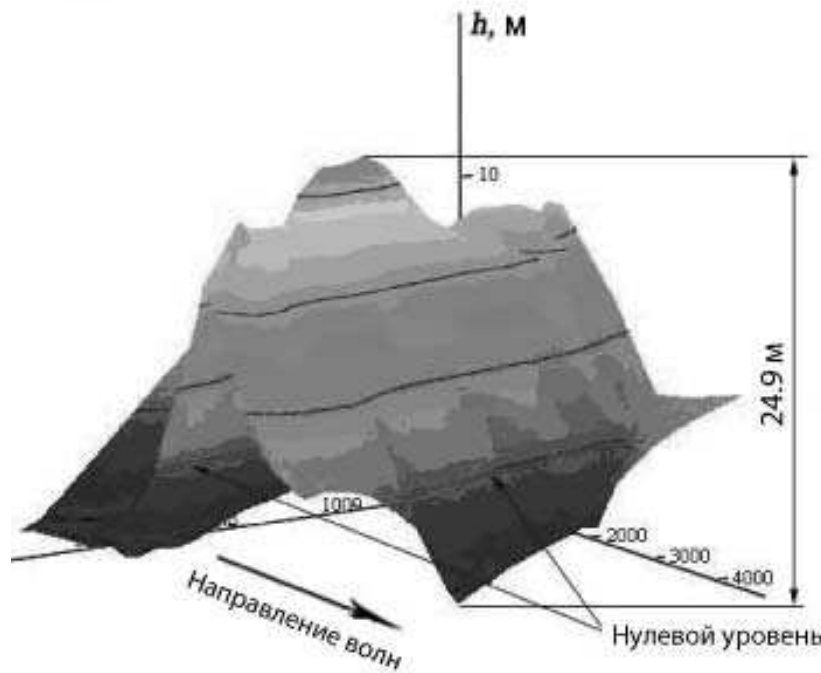


Рис. 6. Пространственная форма волны (рис. 5).
 Параметры, м: $h = 24.9$, $c = 18.2$, $\lambda' = 172$, $\lambda'' = 182$.

Приведенный пример напоминает о российских достижениях в измерениях экстремального волнения и, кроме того, заслуживает упоминания, потому что любая экстремальная волна имеет собственную уникальную форму.

Климатические спектры и прогноз необычных волн. Традиционные статистики (даже частотно направленный спектр) не выявляют необычную волну. Результаты расчетов ансамблей полей волн за десятки лет позволяют изучить волновой климат заданной акватории, являются основой при составлении справочников по режиму волнения [3, 6, 15, 16], однако для указания на наличие необычных волн необходим синтез расчетных спектров волнения. Результаты расчетов показывают, что все разнообразие угловых (частотно-направленных спектров) $S(\omega, \theta)$ может быть сгруппировано в пять классов [15–17].

Приведем краткую характеристику основных классов.

Однопиковые спектры (классы I и II). Преобладает одна система волн, которая может быть как ветровым волнением (класс I), так и зыбью (класс II). Существует только один пик (f_p, θ_p) . Разделение между ветровым волнением и зыбью осуществляется по

безразмерной крутизне $\delta = \frac{h}{\lambda_p} = \frac{2\pi h}{g\tau_p^2} = \frac{8\pi}{g} \sqrt{m_0} f_p^2$. Для ветровых волн $\delta > 0.011$, для зыби

$\delta < 0.011$. Здесь h – значительная высота волны, τ_p – период пика спектра, λ_p – соответствующая ему длина волны, а m_0 – нулевой момент спектра (дисперсия волновой ординаты).

Двухпиковые спектры (классы III, IV). Присутствуют одновременно две волновые системы. Для двухпиковых спектров выделяются два подкласса в зависимости от возраста зыби: две системы зыби (затухающее локальное волнение и зыбь от дальнего шторма, класс III) и смешанное волнение (зыбь и развивающееся на ее фоне ветровое волнение, класс IV).

Многопиковые спектры (класс V). Характерны для сложных волновых полей с двумя или более системами зыби и ветровым волнением на их фоне.

Рассмотренные выше классы спектров справедливы для любой акватории Мирового океана. Региональной изменчивости подвержена только вероятность (повторяемость) классов (табл. 2). Каждый из классов соответствует устойчивому состоянию k ; следовательно, синоптическая изменчивость волнения может быть описана как марковская цепь $k = k(t)$ с матрицей переходных вероятностей $p_{ij}^{(t,t+1)} = P\{k^{(t+1)} = i | k^{(t)} = j\}$, $i, j = \overline{1, m}$, и вектором предельной вероятности $\pi_j = P\{k^{(t)} = j\}$, $j = \overline{1, m}$. Достаточно наглядно представление климатических спектров в виде так называемой звезды. На рис. 7, а приведена звезда климатических спектров для юго-восточной части Баренцева моря. Цифры вокруг окружностей показывают вероятность каждого класса спектров (соответственно 40.5 % для I класса, 16.8 % для V класса и т.п.). Дугами у каждого класса показана вероятность сохранения класса спектров за 3 ч (промежуток времени в один синоптический срок). Стрелки на связях между классами показывают направления переходов, ассоциированные с вероятностями p_{ij} , а вероятности π_j приведены на изображениях соответствующих классов.

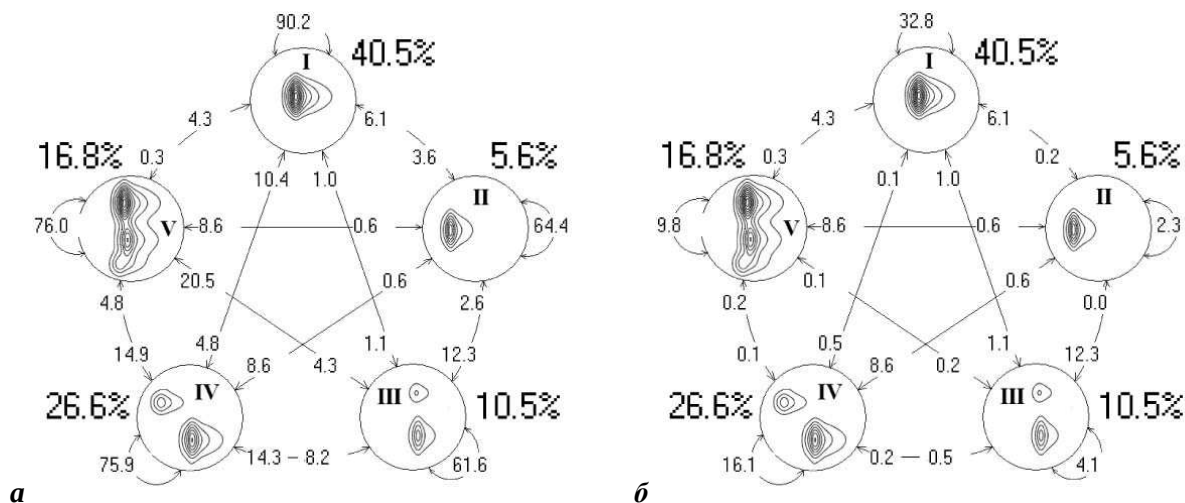


Рис. 7. Звезда климатических спектров (а) и «прыжков» (б) между тройками классов климатических спектров. Юго-восточная часть Баренцева моря.

Таблица 2
Вероятность появления спектров каждого класса
на различных морях, %

Море	Класс спектров				
	I	II	III	IV	V
Балтийское (юго-восточная часть)	23	7	50	3	17
Северное (центр)	38	3	41	5	13
Черное (южная часть)	24	11	56	2	7
Азовское	25	2	52	—	21
Средиземное (центр, южная часть)	3	4	4	60	29
Японское	26	6	10	39	19
Карское	46	5	4	37	8

Ранее отмечалось, что при быстрой смене условий волнообразования вероятность появления необычных волн увеличивается. По данным инструментальных измерений волнения в Черном и Северном морях наиболее часто необычная волна регистрируется при условиях трансформации спектра ветровых волн в смешанное волнение с порождением собственной системы зыби, которое вызывается кратковременной сменой среднего направления ветра. Процесс перехода сопровождается увеличением ширины частотного спектра и углового рассеяния, что является благоприятным для возникновения необычной волны. В случае с климатическими спектрами ветрового волнения такой ситуации соответствуют быстрый переход (прыжки) из одного класса спектров в другой и возвращение в первоначальный класс. Эти ситуации достаточно редки, но их вероятность не стремится к нулю. На рис. 7, б показана звезда прыжков между тройками классов. Из рисунка, в частности, видно, что при сохранении общей вероятности каждого климатического спектра (рис. 7, а) вероятности переходов и прыжков различны. Например, вероятность сохранения класса I в течение 3 ч составляет 90.2 %, а прыжка I-I-I (сохранение класса I в течение трех синоптических сроков) – 32.8 %; вероятность перехода из класса III в класс V составляет 20.5 %, а прыжка III-V-III – всего 0.2 %.

Вероятность различных прыжков для районов Северного моря (с севера на юг) показаны на рис. 8. Из рисунка видно, что вероятность P_{131} имеет максимум на западе моря, а вероятность P_{151} увеличивается от севера к югу моря.

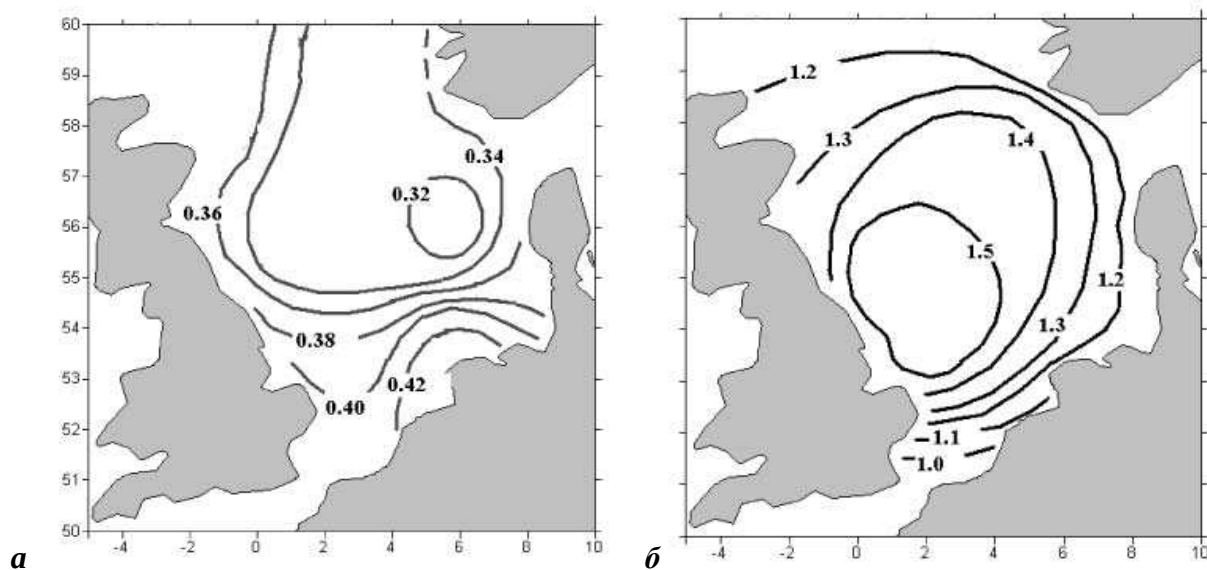


Рис. 8. Вероятность прыжков спектров на Северном море, %.

а – I-V-I (от ветровых волн к сложному волнению и обратно);
б – I-III-I (от ветровых волн к смешанному волнению и обратно).

В случае прыжков из одного класса спектров в другой и обратно вероятность появления необычной волны увеличивается. Это подтверждается сопоставлением рассматриваемой особенности волнового климата с данными измерений. Некоторые случаи регистрации необычных волн представлены в табл. 3, здесь же показаны прыжки для различных классов спектров. Во всех случаях регистрации необычных волн отмечалась быстрая смена классов спектров.

Таблица 3

Даты и типы спектральных прыжков и из одного класса в другой при регистрации необычных волн в Северном и Черном морях

Акватория	Дата	Последовательность классов спектров (каждые 3 ч)
Северное море: North Alwyn	16.11.1993	1 1 3 3 3 1 1 1
	18.11.1993	1 1 1 1 3 3 3 1
N.Cormorant	04.01.1993	1 5 5 3 1 1 1 1
	12.01.1993	3 3 3 3 1 1 1 1
	18.01.1993	1 3 3 3 3 3 1 1
	12.03.1996	1 1 1 1 1 1 1
Draupner	01.01.1995	1 1 1 3 3 1 1 1
Черное море: Геленджик	16.12.2000	4 3 3 1 1 3 1 3
		4 3 3 3 3 1 3 1

Прогноз волнения по спектральным моделям – стандартная процедура, следовательно, прогноз смены спектральной структуры также известен. Это означает, что прогноз спектральных прыжков может быть одним из признаков увеличения вероятности угрозы возникновения необычной волны. Такой подход предупреждения мореплавателей об опасности разработан в рамках европейского проекта, выполнявшегося в 2007–2010 гг.: «Handling Waves. Decision support System for ship operation in Rough Weather» («Управление волнами. Система принятия решений в штормовых условиях»). Соответствующее устройство, предупреждающее капитана об опасности появления необычных волн, установлено на нескольких судах–контейнеровозах компании Гримальди.

Некоторые выводы. Механизмы образования необычной волны допустимо классифицировать как внешние и внутренние (см. табл. 1).

Не каждая большая волна является необычной. Для того чтобы стать таковой, она должна обладать набором параметров. Традиционные методы вероятностного анализа (спектральный и анализ распределений вероятностей) не позволяют обнаружить необычную волну. Оценка вероятности ее появления должна строиться на методах многомерного случайного анализа. В частности, необычная волна может рассматриваться как случайный импульс с параметрами $\Xi = (h, c, \delta, h^+, h^-, \dots)$ в последовательности обычных ветровых волн. Распределение высоты волн с учетом появления необычной волны может быть описано вероятностной моделью выборки с «засорением» – так называемым загрязненным распределением (contaminated distribution), состоящим из двух законов Релея с различными параметрами.

Климатическое распределение параметров необычной волны задается моделью (2), из которой следует, что в самых сильных штормах наибольшие волны необязательно являются необычными.

Необычная волна является единичным событием и в зависимости от критериев, принятых при ее выделении, вероятность появления такой волны на промежутке квазистационарности имеет порядок 10^{-6} – 10^{-7} .

Разнообразие полей волнения может быть охарактеризовано климатическими спектрами, принадлежащими пяти различным классам.

Смена спектральной структуры волнения, проявляющаяся в прыжках из одного класса спектров в другой и обратно, может служить признаком повышения вероятности возникновения необычной волны. Этот вывод подтверждается результатами совместного анализа двумерных спектров волнения и измерениями необычных волн.

Работа выполнена в рамках проектов по реализации Постановлений № 218, 220 Правительства Российской Федерации.

Литература

1. Давидан И.Н., Лопатухин Л.И., Рожков В.А. Ветровое волнение как вероятностный гидродинамический процесс. Л.: Гидрометеиздат, 1978. 287 с.
2. Lopatoukhin L.J., Rozhkov V.A., Ryabinin V.E., Swail V.R., Boukhanovsky A.V., Degtyarev A.B. Estimation of extreme wind wave heights // World meteorological organisation (WMO). WMO/TD – JCOMM Technical report. 2000. N 1041. 71 p.
3. 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. Российский морской регистр судоходства, 2003. 213 с.
4. Lopatoukhin L.J., Lavrenov I.V., Rozhkov V.A., Boukhanovsky A.V., Bokov V.N., Dymov V.I. Wind and wave climate near the Pirazlomnoye oil field // Proc. Int. Conf. «Russian Arctic Offshore» RAO'99. St. Petersburg, 1999. P.319–322.
5. Lopatoukhin L., Boukhanovsky A. Wind and Wave Climate Investigations Related to Offshore Activity // The 10th Workshop on ocean model (WOM-10). October 7–10, 2003. Hanoi, Vietnam.
6. Справочные данные по режиму ветра и волнения Балтийского, Северного, Черного, Азовского и Средиземного морей / Ред. Л.И. Лопатухин, А.В. Бухановский, С.В. Иванов, Е.С. Чернышева. Российский морской регистр судоходства. 2006. 450 с.
7. Давидан И.Н., Лопатухин Л.И. На встречу со штормами. Л.: Гидрометеиздат, 1982. 135 с.
8. Дивинский Б.В., Левин Б.В., Лопатухин Л.И., Пелиновский Е.Н., Слюняев А.В. Аномально высокая волна в Черном море: наблюдения и моделирование // Докл. АН. 2004. Т.395, № 5. С.690–695.
9. Лопатухин Л.И., Бухановский А.В., Дивинский Б.В., Рожков В.А. О необычных волнах в океанах и морях // Научно-технич. сб. Российского морского регистра судоходства, 2003. Вып.26. С.65–73.
10. Бухановский А.В., Дивинский Б.В., Косьян Р.Д., Лопатухин Л.И., Рожков В.А. Типизация ветрового волнения Черного моря по инструментальным данным // Океанология. 2000. Т.40, № 2. С.289–297.
11. Дивинский Б.В., Косьян Р.Д., Подымов И.С., Пушкарев О.В. Экстремальное волнение в северо-восточной части Черного моря в феврале 2000 г. // Океанология. 2003. Т.43, № 6. С.948–950.
12. Pierson W.J. The loss of Two British Trawlers – A study in wave refraction // J. of navigation. 1972. V.25, N 2. P.291–304.
13. Cote L. et al. The directional spectrum of wind generated sea as determined from data obtained by stereo wave observation project SWOP // Meteorol. papers. 1960. V.2, N 6. 88 p.
14. Альбом планшетов стереофотограмметрической съемки волн. Антарктида. Л.: Гидрометеиздат, 1960. 48 с.
15. Справочные данные по режиму ветра и волнения Японского и Карского морей / Ред. Л.И. Лопатухин, А.В. Бухановский, Е.С. Чернышева. Российский морской регистр судоходства, 2009. 356 с.
16. Справочные данные по режиму ветра и волнения Берингова и Белого морей / Ред. Л.И. Лопатухин, А.В. Бухановский, Е.С. Чернышева. Российский морской регистр судоходства, 2010. 565 с.
17. Boukhanovsky A.V., Lopatoukhin L.J., Guedes Soares. Spectral wave climate of the North Sea // App. Ocean Res. 2007. N 29. P.146–154.

Статья поступила в редакцию 27.07.2011 г.

