УДК [551.466:001.891.573](268)

doi: 10.33933/2713-3001-2021-64-515-530

Параметрическая модель поверхностных волн в приложении к Арктическим морям

В. Чешм Сиахи¹, В.Н. Кудрявиев^{1, 2}, М.В. Юровская²

¹ Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург ² Морской гидрофизический институт, РАН, Севастополь, vahid cheshmsiyahi@yahoo.com

Приводятся результаты моделирования поля волн в Баренцевом и Карском морях. Основное внимание уделено волнам в районе нефтяной платформы «Приразломная». В качестве модели использована параметрическая модель [15], а для ветра применены данные реанализа ERA5. Поля волн демонстрируют значительную пространственно-временную изменчивость, связанную как с меняющимся полем ветра, так и эффектом экранирования развития волн особенностями береговой черты. Показано, что при «холодных вторжениях» в проливе Карские ворота образуется зона интенсивного волнения, имеющая характер «узкой струи», выходящей из Карского в Печерское море, в сторону нефтяной платформы. Модельные высоты волн в районе платформы достигают 5 м, что согласуется с наблюдениями.

Ключевые слова: поверхностные волны в Арктике, холодные вторжения, параметрическая модель волн, динамика волновых пакетов, риски связанные с поверхностными волнами.

A parametric model of surface waves as applied to the Arctic seas

V. Cheshm Siyahi¹, V.N. Kudryavtsev^{1,2}, M.V. Yurovskava²

¹ Russian State Hydrometeorological University, St. Petersburg, Russia ² Marine Hydrophysical Institute, RAS, Sevastopol, Russia

This study presents the results of modelling the wave field in the Barents and Kara Seas under strong wind conditions associated with cold air outbreaks. The main attention is paid to the wave characteristics in the area of the Prirazlomnaya oil platform of the Gazprom Neft Shelf company. For the study, the parametric model proposed in [15] was used. Hourly wind fields according to the ERA5 reanalysis data were used as input parameters. The system of equations of the model is solved numerically by the method of characteristics, which provides the possibility to get a visual representation of how the waves develop and evolve in different areas of the sea under the wind field varying in space and time. An efficient procedure for processing / analyzing the numerical solutions results is proposed. The simulated wave fields demonstrate significant spatio-temporal variation associated with both the changes in the wind field and the effect of shielding the development of waves by the features of the coastline. In particular, under cold air outbreak in the Kara Gate Strait, a zone of intense waves, which has the character of a "narrow jet" coming out of the Kara Sea into the Pechersk Sea towards the oil platform, is shown to be formed. The simulated wave height in the area of the platform reaches 5 m, which is consistent with the observations.

Keywords: surface waves in the Arctic, cold air outbreaks, parametric model of surface waves, wave packets dynamics, risks associated with surface waves.

For citation: V. Cheshm Siyahi, V.N. Kudryavtsev, M.V. Yurovskaya. A parametric model of surface waves as applied to the Arctic seas. Gidrometeorologiva i Ekologiva. Journal of Hydrometeorology and Ecology. 2021, 64: 515—530. [In Russian]. doi: 10.33933/2713-3001-2021-64-515-530.

Введение

Физически обоснованная и простая в использовании модель описания статистических характеристик поверхностных волн, особенно их высоты и длины, необходима для многих инженерных и научных приложений, в частности, для краткосрочного прогнозирования волн, генерируемых атмосферными аномалиями с сильным ветром. Помимо практической значимости моделей волн для обеспечения безопасности функционирования прибрежной и морской инфраструктуры и судоходства, в настоящее время волновые поля, генерируемые сильным ветром, систематически используются как важный компонент взаимосвязанной системы атмосфера—океан (coupled model), определяющий ее динамику в экстремальных условиях.

Численные модели эволюции спектра волн, основанные на наиболее «точном» описании притоков / стоков энергии (нелинейных взаимодействий, генерации волн ветром, диссипации), безусловно, способны предоставить необходимую информацию. Мун и др. [1] провели детальное исследование поля волн, генерируемых тропическими циклонами (ТЦ, на примере ТЦ Бонни), с использованием численной модели WAVEWATCH III [2], измерений с поверхностных буев и с самолета, с использованием сканирующего радиолокационного альтиметра (SRA). Результаты этой работы ясно показали, что при реалистичном задании поля ветра модель WAVEWATCH III способна воспроизвести наблюдаемые поля поверхностных волн в урагане.

Однако, значительные вычислительные мощности, требуемые для проведения модельных расчетов, приводят к необходимости разработки упрощенных волновых моделей. Например, простые волновые модели могут помочь быстро оценить и описать роль эффектов резонанса (или явления захвата) при генерации волн в полярных, тропических и внетропических циклонах (см. например, [3-8]). Действительно, несмотря на пространственно-временную неоднородность поля ветра в экстремальных погодных системах, обнаружено, что генерируемые поверхностные волны хорошо подчиняются автомодельным законам (self-similarity laws), первоначально предложенным Китайгородским [9] для идеализированных ветровых условий. Для очень интенсивных систем низкого давления основная вихревая структура ветров, по-видимому, полностью определяет пространственное распределение энергии волн и характеристики их направленности. В этом контексте Wright и др. [10] и совсем недавно Hwang и Fan [11], Hwang и Walsh [12] проанализировали и количественно описали азимутальное и радиальное распределения волновых спектров, измеренных SRA внутри ТЦ. Hwang и Fan [11], Hwang и Walsh [12] далее предложили эмпирическую модель для описания эффективного разгона волн, позволяющую совместно с законами развития волн Китайгородского [9], оценивать распределения волн в ураганах на основе простых соотношений.

Для волн, генерируемых изменяющимся в пространстве и времени полем ветра, более подходящими и относительно простыми являются параметрические модели (например, [13, 14]). Уравнения, описывающие эволюцию энергии, частоты спектрального пика и его направления, выводятся из уравнений сохранения спектра энергии и импульса. Предложенный Хассельманном и др. [14] основной принцип построения параметрической модели состоит в том, что источники энергии и импульса должны быть заданы так, чтобы модель воспроизводила классические законы пространственного развития волн (fetch-laws) для идеализированных случаев пространственно-однородного ветра.

Кудрявцев и др. [15] предложили параметрическую модель генерации и эволюции волн в поле ветра, изменяющемся в пространстве и времени, включая условия штормовых ветров и ураганов. Эта модель эффективно дополняет оперативные волновые модели для моделирования и картирования развития поверхностных волн, создаваемых движущимися тропическими и внетропическими циклонами. Сравнение результатов расчетов по предложенной модели с измерениями волн в ТЦ, приведенных в работах Hwang и Fan [11], Hwang и др. [17], Hwang и Walsh, [12], Young [7], Young и Vinoth [9], продемонстрировали хорошее соответствие, что обосновывает ее использование в практических и научных исследованиях [16].

Основной целью данной работы является применение модели Кудрявцева и др. [15] для исследования волновых полей в условиях сильного ветра в арктических морях, связанных с холодными вторжениями, и сопоставление расчетов с данными наблюдений волн на нефтяной платформе «Приразломная» компании «Газпром Нефть Шельф» в Печорском море.

Материалы и методы исследований

Описание модели

Детальное описание используемой нами модели и ее валидация имеются в работах [15,16]. Здесь мы приведем только основные соотношения модели и краткие пояснения, необходимые для общего понимания.

Основные соотношения модели, описывающей эволюцию энергии, частоты и направления спектрального пика волн задаются в виде системы уравнений (1)—(5). Эта система уравнений представлена в характеристической форме, описывающей как развитие ветрового волнения, так и его эволюцию в виде волн зыби. Преимуществом решения уравнений методом характеристик является то, что волновые лучи (характеристики) дают простую «визуализацию» того, как происходит развитие волн в разных точках акватории и как затем волны эволюционируют в поле переменной скорости ветра. Система уравнений для энергии *e*, групповой

скорости спектрального пика, c_{gp} (связанной с частотой пика как $\omega_p = \frac{g}{(2c_{gp})}$), и

его направления ϕ_p , имеет следующий вид:

$$\frac{d}{dt}\ln(\bar{c}_g e) = -\bar{c}_g G_n + \omega_p \left(\tilde{I}_w - \tilde{D}\right),\tag{1}$$

$$\frac{d}{dt}c_{gp} = -\frac{r_g C_\alpha}{2} \Delta_p g \left(k_p^2 e\right)^2, \qquad (2)$$

517

$$\frac{d}{dt}\varphi_p = -C_{\varphi} \left(\frac{u_{10}}{c_p}\right)^2 \omega_p H_p \sin\left[2\left(\varphi_p - \varphi_W\right)\right],\tag{3}$$

где полные производные обозначают изменения во времени параметров пакетов волн вдоль их траектории в прямоугольной системе координат волнового пакета:

$$\frac{dx}{dt} = \cos\left(\varphi_p\right)\overline{c}_g,\tag{4}$$

$$\frac{dy}{dt} = \sin\left(\varphi_p\right)\overline{c}_g.$$
(5)

В этих уравнениях \tilde{I}_{w} — безразмерный приток энергии от ветра, \tilde{D} — безразмерная интегральная диссипация энергии за счет обрушений волн:

$$\tilde{I}_{w} - \tilde{D} = C_{e}H_{p}\alpha^{2} - \left(\frac{ek_{p}^{2}}{\varepsilon_{T}^{2}}\right)^{n}.$$
(6)

 $H_{p} = \frac{1}{2} (1 + \tanh[10(\alpha - 0.85)])$ — функция Хевисайта, член G_{n} в (1) описывает из-

менения энергии за счет фокусировки или расфокусировки волновых пакетов при их движении в неоднородном поле ветра, Δ_p — колоколообразная функция, заданная как $\Delta_p = 1 - 2 \operatorname{sech}^2 \left(10 \left(\alpha - 0.85 \right) \right)$, $\overline{c}_g = r_g c_{gp}$ — средняя групповая скорость, k_p — волновое число пика, u_{10} — скорость ветра на 10 м над поверхностью моря, c_p — фазовая скорость, $\alpha = \frac{u_{10}}{c_p} \cos \left(\varphi_p - \varphi_w \right)$ — обратной возраст волны, φ_w — на-

правление ветра, х и у — координаты. Коэффициенты модели в уравнениях (1)—

(5) равны;
$$r_g = \frac{\omega_p}{\overline{\omega}} = \frac{\overline{c}_g}{c_{gp}} = 0.87, \ C_{\alpha} = -1.4, \ \left(\frac{\Delta c_g}{\overline{c}_g}\right)^2 = 4.6 \times 10^{-2}, \ C_e = 2.7 \left(\frac{\rho_a}{\rho_w}\right) c_{\beta} c_D,$$

 $C_{\varphi} = 0,225 \left(\frac{\rho_a}{\rho_w}\right) c_{\beta} c_D, \quad \varepsilon_T^2 = 0,15, \quad \rho_w$ — плотность воды, ρ_a — плотность воздуха.

В работе [15] рассматривались условия ураганных ветров, когда коэффициент сопротивления поверхности c_D принимает постоянное значение, независящее от скорости ветра и стратификации. В работе [15] принято, что $c_D = 2 \times 10^{-3}$, а коэффициент ветроволнового взаимодействия c_{β} принят равным $c_{\beta} = 4 \times 10^{-2}$, как средняя эмпирическая оценка значений $c_{\beta} = (2 \div 6) \times 10^{-2}$, предложенных в [19]. Рассматривая условия в Арктике, где скорости ветра (включая полярные циклоны) не превышают 40 м/с, а стратификация атмосферы при холодных вторжениях — сильно неустойчивая, мы ввели модификацию c_D и c_β , полагая, что c_D задается эмпирическими соотношениями COARE 4.0 [20], а c_β задан как $c_\beta = 6 \times 10^{-2}$. В этом случае произведение $c_\beta c_D$ в данной модификации модели при «средних» скоростях ветра 10 м/с равно произведению $c_\beta c_D$ в модели [15].

Для более детального описания модели и ее параметров см. [15].

Процедура расчетов

Уравнения (1)—(5) решались численно с использованием схемы Рунге—Кутта 4-го порядка. Каждая из характеристик представляет собой волновой луч, вдоль которого развивается (эволюционирует) волновой пакет, начиная с момента его генерации. В качестве начального условия при $t = t_0$ задавался набор M волновых пакетов (M — число узлов сетки) с координатами $(x^{j,k=1}, y^{j,k=1}) = (x_0^j, y_0^j)$ (где j = 1 : M и k — номер временного шага в методе Рунге—Кутта) на заданной сетке, представленной на рис. 1. В качестве начальных условий для частоты и энергии j-ого пакета задавались значения, соответствующие законами развития волн во

времени $\frac{\omega_p u_{10}}{g} = c_{\alpha_t} \left(\frac{tg}{u_{10}} \right)^{q_t}$, $\frac{eg^2}{u_{10}^4} = c_{e_t} \left(\frac{tg}{u_{10}} \right)^{p_t}$ для «малого» интервала времени (t = 5 минут). В этих соотношениях константы c_{α_t} , c_{e_t} , q_t и p_t равны $c_{\alpha_t} = 37,25$,

 $c_{e_t} = 4,13e - 08, q_t = -0,334$ и $p_t = 1$ (см., например, [6]; [18]).

При численном решении системы уравнений (1)—(5) методом Рунге—Кутта использовался переменный шаг по времени, что позволило сократить время счета и объем данных. Шаг Δt задавался как доля номинального времени развития волн t_n , определяемое локальным ветром и степенью развития волн:

$$\Delta t^{k,j} = 0,15t_{nom}^{k,j}, \ t_{nom}^{k,j} = \left(\frac{\alpha^{k,j}}{c_{\alpha}}\right)^{\frac{1}{q}} \left(\frac{u_{10}^{k,j}}{g}\right).$$
(7)

Длина шага по времени увеличивается, пока волны развиваются и их обрат-

ный возраст, $\alpha = \left(\frac{u_{10}}{c_p}\right) \cos(\varphi_p - \varphi_w)$, больше 0,85. Однако когда $\alpha \le 0.85$ или

 $\Delta t = 0,15t_{nom} \ge 30$ минут, то Δt задается фиксированным значением равным 30 минутам. При таком определении шага по времени удается существенно ускорить расчет и избежать неустойчивости численного решения при переходе ветровых волн в режим зыби и зыби в ветровые волны при движении пакета в сильно меняющемся по скорости и направлению поле ветра.

В качестве входного параметра использовались поля ветра по данным реанализа модели ERA5, которое доступно на https://cds.climate.copernicus.eu/. ERA5 — это модель пятого поколения ECMWF для глобального климата и погоды, полученная путем объединения моделей с наблюдениями. ERA5 заменяет реанализ ERA-Interim. Временное разрешение данных ERA5 составляет один час, а пространственное разрешение — $0,25 \times 0,25$ град. Поскольку поле ветра меняется во времени и пространстве, то на каждом шаге при численном решении системы уравнений использовалась линейная интерполяция поля ветра (заданная на сетке рис. 1) на текущее положение пакета в пространственно-временной области.

Поле ветра обладает значительной пространственно-временной изменчивостью, которое существенным образом влияло на генерацию и эволюцию волн на акватории Баренцева и Карского морей в течение периода времени с 27 июля 2019 г. по 5 августа 2019 г. Для учета этого фактора нами была разработана следующая процедура модельных расчетов.

Шаг № 1. В интервале времени, в котором исследуется поверхностное волнение, выбираются моменты времени t_0^n , которые будут являться начальными для



Рис. 1. Сетка модели с маской суши. Разрешение сетки — 0,125° × 0,125°. Черная точка —местонахождение нефтяной платформы.

Fig. 1. The model grid with land masked. The grid resolution is 0.125×0.125 degrees. The black dot is the location of the oil platform. генерации волн на регулярной сетке, показанной на рис. 1. В данной работе начальные моменты времени t_0^n привязаны к ежечасным моментам времени, в которые заданы поля ветра ERA5, $t = T_w^n$, т. е. $t_0^n = T_w^n$. Если число карт полей ветра равно N, то общее число семейств решений также равно N. Решение системы уравнений (1)—(5) для начального момента времени t_0^n дает *n*-ое семейство решений $\left[e^n(t,x,y), \omega_p^n(t,x,y), \varphi_p^n(t,x,y)\right]$, описывающее распределение энергии, частоты пика и его направления для каждого из *j*-лучей, стартующих в узлах сетки. Таким образом, всего получается N семейств решений, каждое из которых состоит из M лучей.

Шаг № 2. Полученные на шаге № 1 решения уравнений (1)—(5) заполняют трехмерный пространственно-временной объем. В конце концов, нам нужно знать характеристики волн в заданное время T_{out} в каждой точке на сетке, показанной на рис. 1. Для этого, из трехмерного объема выбираются параметры волновых пакетов, попавшие во временной интервал $T_{out}^i - 30$ мин $\leq t \leq T_{out}^i$ и $T_{out}^{i+1} - T_{out}^i = 60$ мин. После этого пакеты, попавшие в заданный интервал времени, распределяются по пространственным ячейкам (размером $0,125^{\circ} \times 0,125^{\circ}$), привязанных к заданной сетке.

Шаг № 3. На конечном этапе среди всех волновых пакетов, попавших в заданный интервал времени в заданную пространственную ячейку, отбирается волновой пакет с максимальной длиной волны как прототип наиболее развитой волны. Его параметры — высота значимых волн (SWH = $4\sqrt{e}$), длина волны (λ) и направление волн (φ_p) — рассматриваются как решение задачи, дающее поле параметров волн в заданный момент времени на пространственной сетке, охватывающей интересующую акваторию.

Натурные данные

Результаты расчетов могут быть сопоставлены с данными спутниковых измерений волн (например, альтиметрическими), либо с данными натурных измерений. В данной работе модельные результаты сравниваются с данными, полученными на нефтяной платформе «Приразломная», расположенной в Печорском море (рис. 2).

В условиях сильного ветра, когда платформа не окружена морским льдом, в районе платформы наблюдаются очень высокие волны. Здесь мы используем наблюдения волн и ветра с платформы с интервалом 4 часа за период с 27 июля по 5 августа 2019 г. Волновые измерения доступны в баллах, которые пересчитаны в высоты волн (табл. 1). На рис. 2 *а* показаны измерения ветра и волнения за период с 27 июля по 5 августа 2019 г. На этом рисунке видно, что скорость ветра превышает 13 м/с после 20:00 28 июля и достигает 20 м/с в 20:00 29 июля. Также сильный ветер наблюдался с 16:00 2 августа до 16:00 4 августа. В периоды сильных ветров высота значимых волн составляет 2—6 м (4—6 баллов).

Таблица 1

Шкала оценки волнения моря,

разработанная Всемирной метеорологической организацией

Scale for assessing sea waves developed by the World Meteorological Organization

Балл	Описание	Высота, м
0	Спокойная, зеркальная поверхность	0
1	Маленькие волны, рябь	0—0,3
2	Волнистая поверхность; иногда заметны «барашки»	0,3—0,6
3	Неровная поверхность; волны с частыми «барашками»	0,6—1,2
4	Очень неровная поверхность с частыми «барашками»	1,2—2,4
5	Довольно большие волны, брызги	2,4—4
6	Большие волны с пеной	4—6
7	Очень большие перекатывающиеся волны	6—9
8	Огромные волны, много пены	9—14
9	Необычайно огромные волны; море совершенно белое; много пены и брызг	> 14
a)		Волюции Балли Сокрость Ветра 10 15 20 10 15 20 10 15 20 5 5 00 5 5 5 5



Рис. 2. Высоты волн в баллах (сплошная линия),

скорость ветра (штриховая линия) и направление ветра (нижний график), измеренные на платформе (жирные стрелки) и по данным ERA5 (тонкие стрелки).

Fig. 2. Sea State (solid line), wind speed (dashed line), and wind direction (lower graph), measured on the platform (thick arrows) and according to ERA5 data (thin arrows).

Для анализируемого в работе периода времени направление ветра в основном северо-восточное (рис. 2 б). Таким образом, волны, генерируемые в Карском море, могут пройти через пролив Карские ворота и достичь платформы. Поэтому мы рассматривали волны, генерируемые не только в Баренцевом и Печорском морях, но и волны, генерируемые в Карском море. Для проведения модельных расчетов используется регулярная сетка 0,125° × 0,125° (рис. 1). На эту сетку наложена маска суши, которая при необходимости может быть дополнена маской льда. На рис. 1 также отмечено положение нефтяной платформы (черная точка).

Результаты и их обсуждение

На рис. 3 показаны траектории и динамика трех «типичных» волновых пакетов, сгенерированных в 00:00:00 27 июля 2019 г. разных районах моря. Пакет волн, стартующий к западу от Новой Земли, развивается при скорости ветра 9 м/с, которая увеличивается по ходу движения пакета (рис. 3 δ). В результате, высота волн (рис. 3 ϵ) и их длина (рис. 3 ϵ) быстро увеличиваются. Через 23 ч, когда скорость ветра уменьшается, уровень энергии (SWH) также уменьшается, но длина волны остается постоянной. Через некоторое время, при t = 32 ч, скорость ветра снова увеличивается. Поскольку обратный возраст волн меньше 0,85 (см рис. 3 δ),



Рис. 3. Пример траекторий волн и эволюция параметров волновых пакетов во времени. *a*) Траектории пакетов волн в условиях ветра, меняющегося во времени и пространстве, начиная с 00:00:00 27 июля 2019 г., и эволюция параметров волн вдоль траектории: *б*) скорость ветра (м/с); *в*) высота значительных волн (м); *г*) длина волн (м); *д*) обратный возраст волн.

Цвет каждого луча на графике (*a*) соответствует текущему времени указанному на цветовой шкале. Цветные точки указывают начальные положение пакетов. Тот же цвет используется на других графиках для выделения лучей.

Fig. 3. An example of wave-trains trajectories and evolution of wave packets parameters in time. *a*) Wave trajectories in conditions of wind changing in time and space, starting from 00:00:00 on July 27, 2019, and the evolution of the parameters along the trajectories:
δ) wind speed in m/s; *e*) significant wave height in m; *e*) wavelength in m; *g*) inverse wave age.

The colour of each ray on the graph (*a*) corresponds to the travel time indicated on the colour scale. The coloured dots indicate the starting location of the selected wave rays. The same colour is used in other plots to indicate the temporal evolution of wave parameters along given rays. то волна превращается в зыбь, и увеличение скорости ветра не влияет на уровень ее энергии.

Другие пакеты волн, обозначенные красными и черными точками, начинаются со слабого ветра и движутся с небольшим уровнем энергии и групповой скоростью, зависящей соответственно от их высоты и длины. При увеличении скорости ветра (через 27 и 30 ч с начала, соответственно для красных и черных точек), эти пакеты волн начинают развиваться. На рис. З *г* видно, что при увеличении скорости ветра эти волны интенсивно развиваются, пока не достигнут береговой линии. Следует отметить, что при $\alpha \le 0.85$ волны относятся к группе зыби и поэтому не чувствуют изменения направления ветра. Однако, когда волны являются ветровыми ($\alpha > 0.85$), направление волн сильно зависит от направления ветра. Также видно, что волны, которые начинают генерироваться при слабом ветре, распространяются медленнее, и им требуется больше времени для достижения границы по сравнению с волнами, «стартующими» при сильном ветре. Отметим, что волны с обратным возрастом $\alpha < 0$ — это волны, движущиеся против ветра.

Как отмечено выше, модельные расчеты с новыми начальными условиями повторяются каждый час. В результате получается семейство решений, которые генерируются в разных начальных ветровых условиях и продолжают развиваться во времени в переменном поле ветра по мере их эволюции в пространстве. Когда вся пространственно-временная трехмерная область заполнена волнами, необходимо сделать срез этого объема для фиксированного времени и спроецировать волны, попавшие в этот срез на двухмерную (широта—долгота) горизонтальную плоскость. Для этого из всех волновых пакетов, попавших в «элементарную» ячейку, выбирается наиболее длинная (т. е. развитая) волна с длиной λ, соответствующая ей SWH и направление.

Чтобы проиллюстрировать эту процедуру, на рис. 4 *а* показаны две области в разных районах (отмечены цифрами 1 и 2), для 12:00:00 3 августа 2019 г. Пространственное распределение волновых пакетов в каждой из этих областей показано на графиках рис. 4 δ и 4 d. Видно, что поля волн в каждой из этих областей представляют суперпозицию волновых пакетов разной энергии и групповой скорости. Двумерные гистограммы распределения высот волн в зависимости от длины и направления распространения волновых пакетов («спектры» волн) показаны на рис. 4 *в* и 4 *е* соответственно. Эти гистограммы отчетливо иллюстрируют наличие широкого спектра волн разных масштабов, как сгенерированных «недавно», так и максимально развитых, оказавшихся в данный момент в выбранной пространственной области. Например, в области № 1 на рис. 4 *а* самая длинная волна будет иметь $\lambda = 130$ м, SWH 5,3 м и $\phi_{a} = 230^{\circ}$.

Эта процедура отбора максимально длинной волны и соответствующих ей параметров применяется в модели в каждой ячейке расчетной сетки, как это показано на рис. 5. На рис. 5 *а* представлено пространственное распределение волновых пакетов, относящееся к области \mathbb{N} 1 на рис. 4 *а*. Квадратные символы указывают самые длинные волны в каждой из элементарных ячеек. Их направления отмечены черными стрелками. На рис. 5 *б* представлено результирующее поле волн, где в каждой ячейке параметры волн соответствуют самой длинной

В. ЧЕШМ СИАХИ, В.Н. КУДРЯВЦЕВ, М.В. ЮРОВСКАЯ





Рисунок слева — поле высоты значимых волн 03.09. 2019. Рисунок справа: верхний ряд — положение волновых пакетов в областях № 1 и № 2 (см. левый рисунок) с указанием высоты волн и движения; средний ряд — гистограммы распределения высот волн в пакетах по их длине и направлениям; нижний ряд — гистограммы распределения времени генерации пакетов волн по их длине направлениям.

Fig. 4. Superposition of wave packets.

Figure on the left — the field of the height of significant waves 03.09. 2019. Figure on the right: top row — position of wave packets in areas No. 1 and No. 2 (see left figure) with indication of wave height and movement; middle row — histograms of distribution of wave heights in packets along their length and directions; bottom row — histograms of the distribution of the generation time of wave packets along their length and directions.

волне. На рис. 5 *в* и *г* показано то же, что на рис. 5 *а* и *б*, но для сечения № 2 на рис. 4 *а*.

После применения процедуры расчетов, описанной выше, результатом моделирования являются ежечасные карты полей волновых параметров на однородной сетке заданного разрешения (в данном случае 0,125°×0,125°). На рис. 6 приведены некоторые примеры волновых полей с 27 июля по 5 августа 2019 г., когда появлялись самые высокие волны: верхний ряд — поле ветра, средний ряд — поле SWH и в нижнем ряду — поле длин волн с указанием их направления. На этом рисунке точка, обозначенная черным цветом, указывает местоположение нефтяной платформы.

В тех областях, где развитие волн происходит от береговой черты, отчетливо видны эффекты разгона волн, сопровождающиеся ростом высоты и длины волны по мере удаления от берега. Самые высокие и самые длинные волны — это те, которые развиваются в Карском море и, проходя через пролив Карские ворота, появляются в Печорском море в виде «струи» интенсивного волнения. Эти волны,



Рис. 5. Пространственное положение пакетов волн в области № 1 (*a*) (см. рис. 4) с указанием (цветом) их высоты; квадраты со стрелками указывают волновые пакеты с максимальной длинной волны. *б*) Результат присвоения каждой ячейке высоты волны и направления самой длинной волны.

Рисунки (в) и (г) — то же самое, что на (а) и (б), но для области № 2 (см. рис 4).

Fig. 5. Spatial distribution of wave packets in area No. 1 (*a*) (see Fig. 4) with indication (colour) of their height; the squares with arrows indicate the wave packets with the maximum wavelength. δ) Result of assigning to each cell the wave height and direction of the longest

wave.

Figures (β) and (z) are the same as in (a) and (δ), but for area No. 2 (see Fig. 4).

имея максимально возможный разгон, появляются в районе платформы. В этих случаях направлении ветра должно быть около 220 °. Видно, что область интенсивного волнения локализована в пространстве (имеет вид струи), и при изменениях направления ветра платформа может оказаться как в области сильного волнения, так и в области «тени» за островом Вайгач.

Сопоставление модельных расчетов в районе платформы с данными измерений показано на рис. 7. Так как платформа расположена на границе струи, то незначительные «ошибки» в направления модельного ветра, используемого для расчета волн по сравнению с реальным ветром, могут привести к тому, что зона интенсивного волнения будет немного смещена от платформы. Поэтому, в

В. ЧЕШМ СИАХИ, В.Н. КУДРЯВЦЕВ, М.В. ЮРОВСКАЯ



Рис. 6. Примеры пространственного распределения (верхний ряд) ветра, (средний ряд) высот значимых волн, (нижний ряд) длины волны и направления.

Дата и время указаны в заголовке каждого из столбиков.

Fig. 6. Examples of spatial distribution (top row) of wind, (middle row) significant waves height, (bottom row) wavelengths and directions.

The date and time are indicated in the header of each column.



Рис. 7. Изменения высот волн во времени в районе платформы «Приразломная».

Красная и черная линии — наблюдаемая высота волн. Синяя и зеленая линии — модельные расчеты высоты волн в «струе» интенсивного волнения и в зоне волновой тени соответственно.

Fig. 7. Wave height Changes in time in the area of the Prirazlomnaya platform.

The red and black lines are the observed wave heights. Blue and green lines — model calculations of wave heights in the "jet" of intense waves and in the wave shadow zone, respectively.

качестве нижнего предела модельного предсказания волн. На рис. 7 приведены высоты волн генерируемые с ограниченным разгоном от острова Вайгач.

Сравнение графиков на рис. 7 показывает, что модельные расчеты неплохо соответствуют наблюдаемым высотам волн. Модель воспроизводит максимальные наблюдаемые высоты волн, а минимальные наблюдаемые могут быть связаны с эффектом затенения волнового поля островом Вайгач. Отличия направления ветра в данных ERA5 от реального, которые можно видеть на рис. 2 б, вполне объясняет появление эффекта затенения развития волн, наблюдаемые на платформе в моменты времени между 31 июля и 3 августа и после 4 августа.

Заключение

В данной статье приводятся результаты моделирования поля волн в Баренцевом и Карском морях в условиях сильного ветра, связанного с холодными вторжениями. Основное внимание уделено волновым характеристикам в районе нефтяной платформы «Приразломная» компании «Газпром Нефть Шельф». Для исследования использована параметрическая модель генерации и эволюции волн, предложенная в [15]. В качестве входных параметров использовались ежечасные поля ветра по данным реанализа ERA5.

Система уравнений модели решается численно методом характеристик, который позволяет получить наглядное представление, как волны, генерируемые в разных областях моря, развиваются и эволюционируют в поле ветра, изменяющемся в пространстве и времени. Предложена эффективная процедура обработки / анализа полученных решений, позволяющая получать с заданной периодичностью (ежечасные в данном случае) поля параметров волн (высота и длина волн, направление) на регулярной сетке.

Модельные поля поверхностных волн на акватории Карского и Баренцева морей демонстрируют значительную изменчивость, связанную как с меняющимся в пространстве и времени полем ветра, так и влиянием «сложной конфигурации» береговой черты. В рассматриваемом примере о. Южный (Новая Земля) и о. Вайгач экранируют развитие волн, и за их подветренной стороной образуются «теневые» области в поле волн, где высоты и длины волн нарастают по мере удаления от береговой черты. В то же время наличие пролива между островами обеспечивает непрерывное развитие волн, «стартующих» в Карском море и распространяющихся по мере развития в Печорское море. В результате образуется зона интенсивного ветрового волнения, имеющая характер струи, выходящей из пролива Карские ворота в сторону нефтяной платформы. Модельные высоты и длины волн в районе платформы достигают значений 5 и 200 м соответственно, которые согласуются с наблюдаемыми с платформы значениями. В данном случае платформа находится на границе «струи» интенсивного волнения, поэтому, небольшие изменения направления ветра приводят к тому, что платформа оказывается либо в зоне струи с высокими и опасными волнами, либо попадает в зону волновой тени за о. Вайгач, где, несмотря на сильный ветер, волны имеют относительно малые и безопасные высоты.

Соответствие модели данным наблюдений свидетельствует о ее достоверности и возможности использования для практических приложений.

Благодарности

Результаты, представленные в данной работе, получены при финансовой поддержке Российского Научного Фонда, грант № 21-47-00038, и Госзадания Министерства науки и образования № 0763-2020-0005 и Госзадание № 0555-2021-0004 МГИ РАН. Данные по волнению в районе платформы «Приразломная» предоставлены ООО «Газпром Нефть Шельф» в рамках контракта № ГНШ-20/11140/00056/Р с РГГМУ.

Acknowledgments

The results presented in this work were obtained with the financial support of the Russian Science Foundation, Grant No. 21-47-00038, and State Assignment of the Ministry of Science and Education No. 0763-2020-0005 State Assignment No. 0555-2021-0004 MGI RAS. Wave data in the Prirazlomnaya platform area were provided by Gazprom Neft Shelf LLC under contract No. ΓΗШ-20/11140/00056/P with the Russian State Hydrometeorological University.

References

- Moon I.-J., Ginis, I., Hara T., Tolman, H.L., Wright C.W., Walsh E.J. Numerical simulation of sea surface directional wave spectra under hurricane wind forcing. Journal of Physical Oceanography. 2003, 33: 1680—1706. doi: 10.1175/2410.1.
- 2. *Tolman H.L.* User manual and system documentation of WAVEWATCH III version 3.14, Tech. Note 276 (p. 194). NOAA/NWS/NCEP/MMAB.
- 3. *Bowyer P.J., MacAfee A.W.* The theory of trapped-fetch waves with tropical cyclones An operational perspective. Weather and Forecasting. 2005, 20: 229—244. doi: 10.1175/WAF849.1.
- Dysthe K.B., Harbitz A. Big waves from polar lows? Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography. 1987, 39A: 500—508. doi: 10.1111/j.1600-0870.1987.tb00324.x.
- 5. *King D.B., Shemdin O.H.* Radar observations of hurricane wave directions. In Proceedings of 16th international conference on coastal engineering. American Society of Civil Engineers. 1978: 209–226.
- Kudryavtsev V., Golubkin P., Chapron B. A simplified wave enhancement criterion for moving extreme events. Journal of Geophysical Research: Oceans. 2015, 120: 7538–7558. doi: 10.1002/2015JC011284.
- 7. Young I.R. Parametric Hurricane Wave Prediction Model. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering. 1988, 114: 5: 637-652. doi: 10.1061/(ASCE)0733-950X(1988)114:5(637).
- 8. *Young I.R., Vinoth J.* An "extended fetch" model for the spatial distribution of tropical cyclone wind-waves as observed by altimeter. Ocean Engineering. 2013, 70: 14–24. doi: 10.1016/j.oceaneng.2013.05.015.
- Kitaigorodskii S.A. Applications of the theory of similarity to the analysis of wind-generated water waves as a stochastic process. Bulletin of the Academy of Sciences of the USSR. Geophysics Series. 1962, 1: 105–117.
- Wright C.W., Walsh E.J., Vandemark D., Krabill W.B., Garcia A.W., Houston S.H., Murillo S.T., Powell M.D., Black P.G., Marks Jr F.D. Hurricane directional wave spectrum spatial variation in the open ocean. Journal of Physical Oceanography. 2001, 31: 2472—2488. doi: 10.1175/1520-0485(2001)031<2472:hdwssv>2.0.co;2.
- 11. *Hwang, P.A., Fan, Y.* Effective fetch and duration of tropical cyclone wind fields estimated from simultaneous wind and wave measurements: surface wave and air-sea exchange computation. Journal of Physical Oceanography. 2017, 47: 447–470. doi: 10.1175/JPO-D-16-0180.1.

ОКЕАНОЛОГИЯ

- 12. *Hwang P.A., Walsh E.J.* Propagation directions of ocean surface waves inside tropical cyclones. Journal of Physical Oceanography. 2018, 48: 7: 1495—1511. doi: 10.1175/JPO-D-18-0015.1.
- Gunther H., Rosenthal, W., Weare T.J., Worthington B.A., Hasselmann K., Ewing J.A. A hybrid parametrical wave predictionmodel. Journal of Geophysical Research. 1979, 84: C9: 5727. doi: 10.1029/ jc084ic09p05727.
- Hasselmann K., Sell W., Ross D. B., Müller P. A parametric wave prediction model. Journal of Physical Oceanography. 1976, 6: 200—228. doi: 10.1175/1520-0485(1976)006<0200:APWPM>2.0.CO;2.
- Kudryavtsev V.N., Yurovskaya M.V., Chapron B. 2D parametric model for surface wave development in wind field varying in space and time. Journal of Geophysical Research: Oceans. 2021: 126. doi: 10.1029/2020JC016916.
- Kudryavtsev V.N., Yurovskaya M.V., Chapron B. Self-Similarity of Surface Wave Developments Under Tropical Cyclones. Journal of Geophysical Research: Oceans. 2021: 126. doi: 10.1029/2020JC016915.
- Hwang P.A., Fan Y., Ocampo-Torres F.J., García-Nava H. Ocean surface wave spectra inside tropical cyclones. Journal of Physical Oceanography. 2017, 47: 2393—2417. doi: 10.1175/JPO-D-17-0066.1
- Dulov V., Kudryavtsev V., Skiba E. On fetch- and duration-limited wind wave growth: Data and parametric model. Ocean Modelling. 2020, 153: 101676. doi: 10.1016/j.ocemod.2020.101676.
- Plant W.J. A relationship between wind stress and wave slope. Journal of Geophysical Research, 1982, 87: 1961—1067. doi.org/10.1029/jc087ic03p01961.
- 20. Fairall C.W., Bradley E.F., Hare J.E., Grachev A.A., Edson J.B. Bulk parameterization of air—sea fluxes: Updates and verification for the COARE algorithm, J. Clim., 2003, 16: 571—591.

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 20.05.2021 Принята к публикации 04.08.2021

Сведения об авторах

Чешм Сиахи Вахид, аспирант, 2 курс, ФГБОУ ВО «РГГМУ», кафедра ПО ЮНЕСКО-МОК и КУПЗ, Лаборатория спутниковой океанографии РГГМУ, младший научный сотрудник, vahid_ cheshmsiyahi@yahoo.com.

Кудрявцев Владимир Николаевич, д-р физ.-мат. наук, заведующий Лаборатории спутниковой океанографии РГГМУ, kudr@rshu.ru.

Юровская Мария Владимировна, канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, Отдел дистанционных методов исследований, ФГБУН ФИЦ «МГИ», РАН (Севастополь), mvkosnik@gmail.com.

Information about authors

Cheshm Siyahi Vahid, post-graduate student, 2nd year, RSHU, Department of UNESCO-IOC and KUPZ, junior researcher, Satellite Oceanography Laboratory, vahid_cheshmsiyahi@yahoo.com.

Kudryavtsev Vladimir, Nikolaevich, Grand PhD (Phys. and Math. Sci.), Head of the Satellite Oceanography Laboratory, kudr@rshu.ru.

Yurovskaya, Maria, Vladimirovna, PhD (Phys. and Math. Sci.), Senior Researcher, Department of Remote Research Methods, MHI, RAS, Sevastopol, vkosnik@gmail.com.