

УДК 534.143

Верификация модельных расчетов волнения на акватории Обской губы по данным инструментальных измерений в 2015–2017 годах

***П.В. Коробов, В.В. Алексеев, В.И. Дымов,
Н.П. Яковлева, К.Г. Смирнов***

*Арктический и антарктический научно-исследовательский
институт, г. Санкт-Петербург, Россия
wave@aari.ru*

Произведено сравнение данных численной реализации волновой модели SWAN для акватории Обской губы и данных инструментальных наблюдений, полученных лабораторией «Арктик-шельф» (ФГБУ «АНИИ») в 2015–2017 гг. Приведены результаты верификации модели SWAN по имеющимся инструментальным измерениям и статистические оценки качества результатов модельных вычислений.

Ключевые слова: ветровое волнение, численное моделирование, верификация, волновая модель SWAN

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2020-2-79-89>

Verification of model calculations of waves in the Gulf of Ob on the basis of instrumental measurement data in 2015-2017

***P.V. Korobov, V.V. Alekseev, V.I. Dymov,
N.P. Yakovleva, K.G. Smirnov***

*Arctic and Antarctic Research Institute, Saint-Petersburg, Russia
wave@aari.ru*

This article presents the results of comparing the data of the numerical implementation of the SWAN wave model for the waters of the Gulf of Ob and measurement data. The SWAN model was verified using the available instrumental measurements, and statistical assessments of the quality of the results of model calculations are given.

Keywords: wind wave, numerical modelling, verification, SWAN

Введение

Необходимость расчетов и прогнозов ветрового волнения обусловлена опасностью этого явления для судов и инфраструктуры в регионах ведения хозяйственной деятельности. Для арктических морей эта необходимость растет по мере ускорения таяния льда и большей открытости акваторий. Это в полной мере относится и к акватории Обской губы. Ввиду активной хозяйственной деятельности в этом регионе и связанного с ней интенсивного судоходства необходимы научно-обоснованные

методы прогнозирования опасных явлений на этой акватории. Для расчетов и прогнозов волнения существует ряд современных численных моделей: AARI-PD2 [1–6], SWAN [<http://www.swan.tudelft.nl>], WAVEWATCH-III [8–11], WAM [12, 13].

В настоящее время численное моделирование ветрового волнения основано на решении уравнения эволюции спектральной плотности волнового действия $N(k, \beta, \varphi, \vartheta)$, которое можно записать в виде:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial N}{\partial \varphi} \dot{\varphi} + \frac{\partial N}{\partial \vartheta} \dot{\vartheta} + \frac{\partial N}{\partial k} \dot{k} + \frac{\partial N}{\partial \beta} \dot{\beta} + \frac{\partial N}{\partial \omega} \dot{\omega} = G, \quad (1)$$

где N – функция широты φ , долготы ϑ , волнового числа k и β – угла между направлением волнового вектора и параллелью (направлением на восток), а также частоты ω и времени t ; G – функция источника, которая определяется физическими механизмами, формирующими спектр волнения. Она записывается в виде ряда компонент, из которых в основном используются следующие:

$$G = G_{in} + G_{nl} + G_{ds_1} + G_{ds_2}, \quad (2)$$

где G_{in} – поступление энергии от ветра к волнам; G_{ds_1} – диссипация волновой энергии, связанная с обрушением гребней волн; G_{ds_2} – диссипация за счет донного трения; G_{nl} – нелинейное взаимодействие в спектре ветрового волнения.

Современные математические модели расчета и прогноза ветрового волнения можно разделить по способу решения спектрального уравнения баланса волновой энергии (1) на дискретно-спектральные модели (SWAN, WAVEWATCH-III, WAM) и спектрально-параметрические модели (AARI-PD2 и др.). В дискретно-спектральных моделях в результате решения уравнения (1) определяется частотно-направленный спектр, по которому рассчитываются все параметры ветрового волнения, включая как параметры ветровых волн, так и параметры волн зыби. В спектрально-параметрической модели отдельно определяются частотно-направленные спектры ветровых волн и волн зыби, а характеристики смешанного волнения определяются как результат их взаимодействия.

Модель SWAN свободно распространяется с открытым исходным текстом программ. Она создавалась специалистами технологического университета г. Делфт (Нидерланды) специально для расчетов и прогнозов волнения на ограниченных по пространству мелководных акваториях и может учитывать взаимодействие ветра, волн, течений, уровня моря, а сейчас – еще и параметров льда. Эта модель широко используется в мире для научных, инженерных расчетов, а также в оперативной и консультационной практике. Именно поэтому в данной работе была использована одна из последних версий модели SWAN (41.31) для расчетов на мелководной акватории Обской губы.

Для обоснованного применения той или иной модели при прогнозировании волнения необходимо провести верификацию данной модели и параметров этой модели для конкретной акватории. Следует отметить, что Обская губа очень сложна для расчетов параметров волнения из-за изогнутой и вытянутой акватории. Также для корректной работы модели необходима батиметрия высокого разрешения.

В этой статье приводим результаты верификации модели SWAN для Обской губы, предполагая, что для этой акватории возможно использование и других моделей.

1. Описание входных данных, данных измерений и параметров модели

Инструментальные наблюдения в акватории Обской губы были получены лабораторией «Арктик-шельф» в 2015 и 2016 гг. в точке 71° с. ш., $73,56^\circ$ в. д. и в 2017 г. в точке $70,972^\circ$ с. ш., $73,781^\circ$ в. д. (рис. 1).

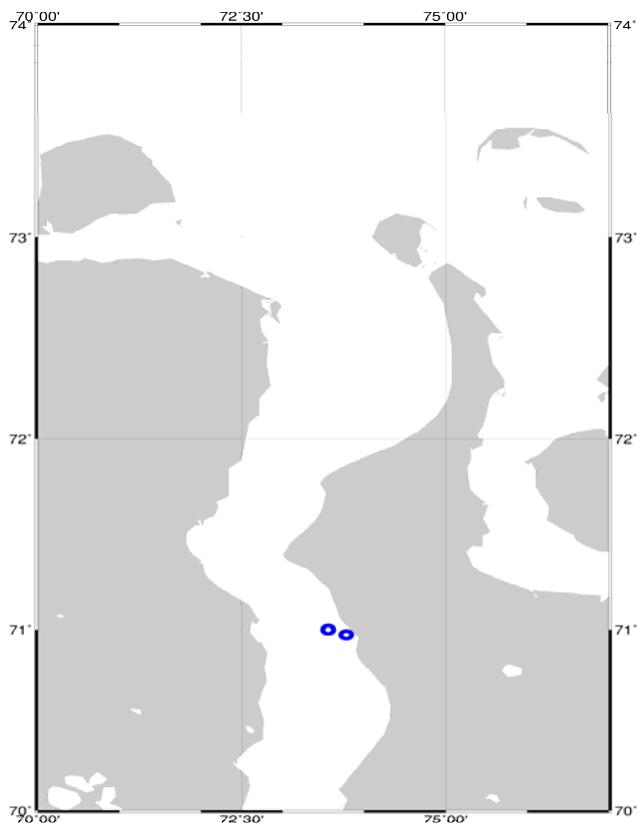


Рис. 1. Расположение донных станций в акватории Обской губы.

Fig. 1. Location of bottom stations in the waters of the Gulf of Ob.

Наблюдения проводились посредством установленных в составе автономных донных станций акустических доплеровских профилографов течений AWACAST 600 (производства компании Nortec, Норвегия), с функцией измерения волнения и его параметров (высота, период и направление волн).

Численное моделирование волнения осуществляется на основе следующих данных: скорость и направление ветра, сплоченность льда, батиметрия. В данной работе для получения данных о ветре и сплоченности льда использовался реанализ ERA-5 за 2015-2017 гг. с горизонтальным разрешением $0,25^\circ \times 0,25^\circ$. Данные ветра использовались с дискретизацией по времени 1 час, временная дискретизация для льда – 1 сутки. Детальная батиметрия уточнялась сотрудниками лаборатории «Арктик-шельф». Глубина на входе в Обскую губу в среднем составляет 20 м. В точках проведения измерений глубины составили 22 м (71° с. ш., $73,56^\circ$ в. д.) и 6 м ($70,97^\circ$ с. ш., $73,78^\circ$ в. д.).

Параметры волнения рассчитывались волновой моделью SWAN версии 41.31 с использованием вложенных сеток. Сначала проводились вычисления для «внешней» области, представляющей из себя всю акваторию Северного Ледовитого океана (СЛО) с разрешением $0,75^\circ \times 0,25^\circ$. Граничные условия из «внешней» сетки передавались во вложенную расчетную сетку с разрешением 3×1 минут, ограниченную областью $66-74^\circ$ с. ш., $70-77^\circ$ в. д.

На рис. 2–4 приведены расчетные сетки для общего расчета в СЛО и для вложенной сетки Обской губы, а также пример расчета.

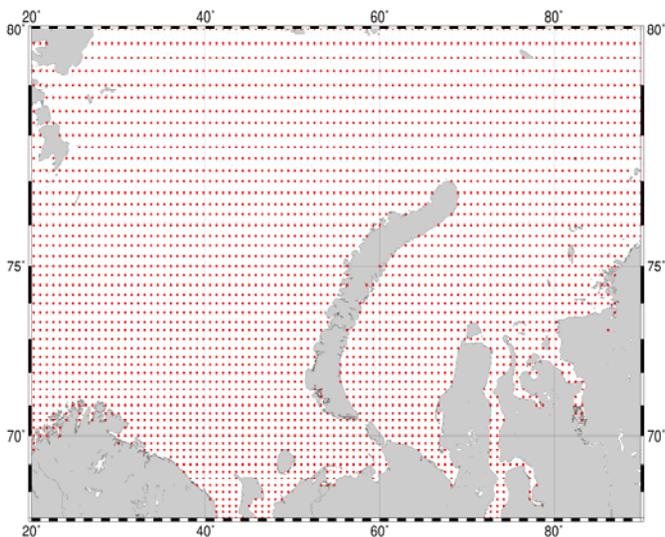


Рис. 2. Фрагмент расчетной сетки расчета параметров волнения на акватории СЛО.

Fig. 2. A fragment of the computational grid for calculating the parameters of the waves in the water area of the Arctic Ocean.

Приведем краткое описание используемых параметров модели SWAN.

Для «внешней» сетки акватории СЛО применялся режим GEN3 с параметрами:

- схема роста KOMEN ($cds2=2.36e-5$, $stpm=3.02e-3$);
- трех- и четырехволновое взаимодействие (Quadrupl, Triad);
- обрушение (Breaking constant, $\alpha=1.0$, $\gamma=0.73$);
- донное трение (Friction Jonswap Constant $cf=0.067$).

При расчете на «внешней» сетке учитывался параметр AICE, который доступен в версии SWAN 41.31 и характеризует сплоченность льда.

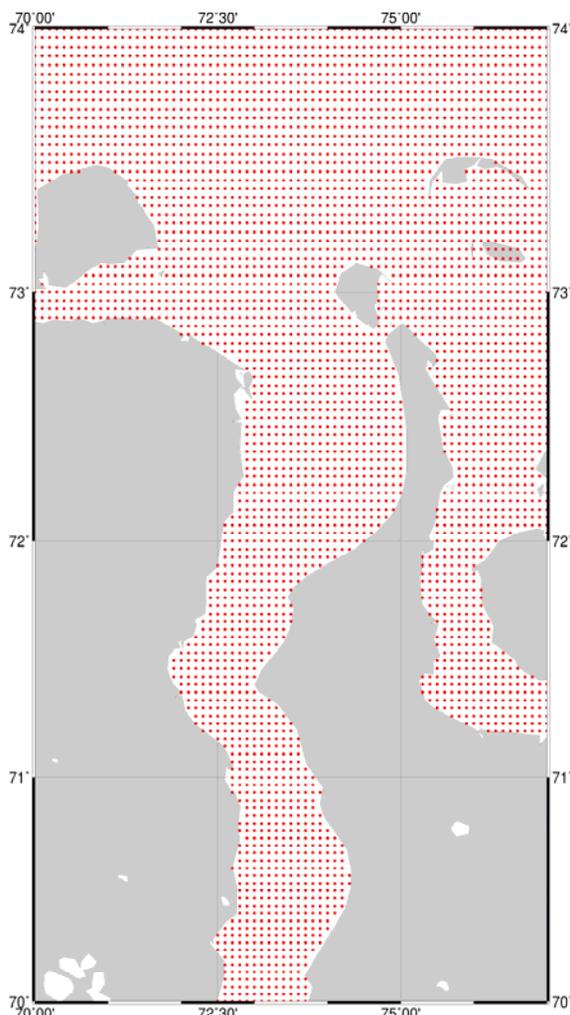


Рис. 3. Вложенная расчетная сетка для Обской губы.
Fig. 3. Nested grid for Gulf of Ob.

Расчет параметров волнения для вложенной сетки в акватории Обской губы производился в режиме GEN2 со следующими параметрами:

- коэффициент линейного роста волн $cf10=188$;
- коэффициенты экспоненциального роста волн $cf20=0.59$, $cf30=0.12$;
- коэффициент диссипации $cf40=250$.

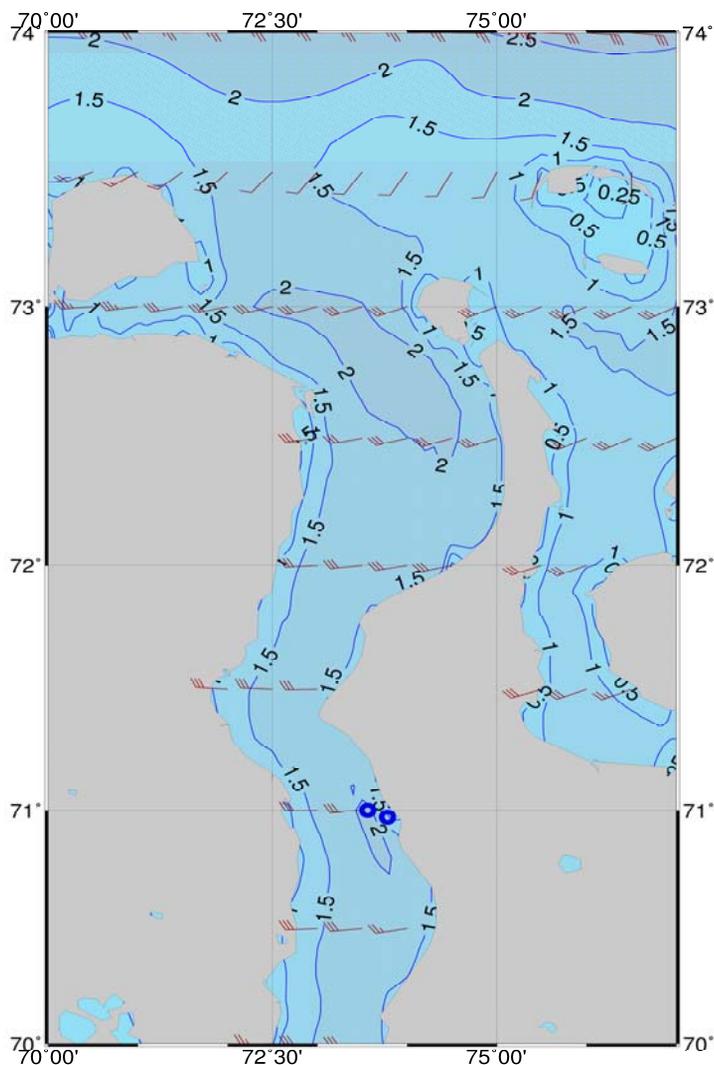


Рис. 4. Пример расчета волнения на 15 часов 31 июля 2017 г. Синие изолинии – значительные высоты волн (H_s), красные «перья» – модуль и направление ветра.

Fig. 4. An example of calculating of wave heights at 3 pm on July 31, 2017. Blue contours – significant wave heights (H_s), red “feathers” - module and wind direction.

Для такой мелкомасштабной акватории доступные в реанализе ERA5 данные о сплоченности льда с разрешением $0,25^\circ \times 0,25^\circ$, являются недостаточно подробными и сильно искажают результат вычислений. Поскольку периоды, в которые проводились измерения, являются практически безледными для акватории Обской губы, то сплоченность льда не принималась в расчет, и параметр AICE не был учтен.

2. Сопоставление численных данных и данных наблюдений

Графическое представление сопоставления временных рядов результатов измерений и численного моделирования представлено на рис. 5–7.

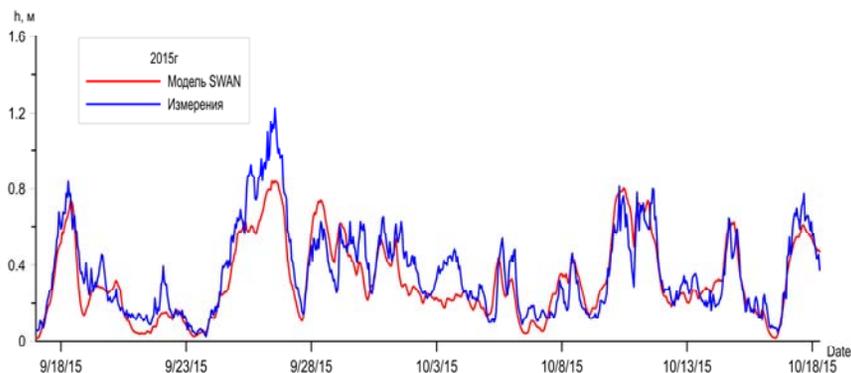


Рис. 5. Сопоставление расчетных временных рядов и данных измерений за 2015 г. в точке 71° с.ш., 73.56° в.д. (h – средняя высота волны, Date – дата измерения в формате месяц/день/год).

Fig. 5. Comparison of calculated time series and measurement data for 2015 at 71° N, 73.56° E (h – average wave height, Date – measurement date in the format month/day/year).

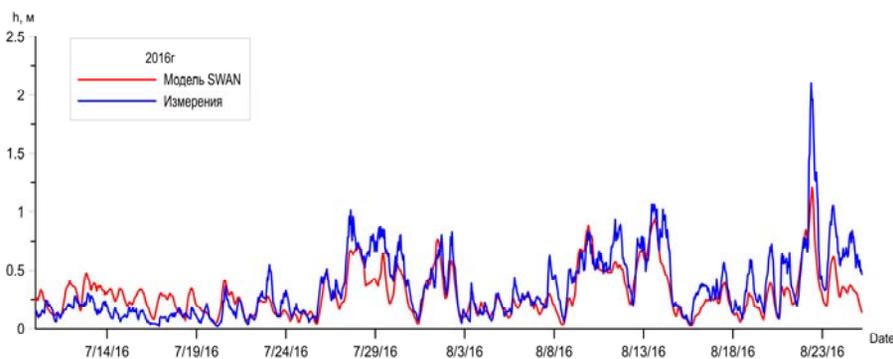


Рис. 6. Сопоставление расчетных временных рядов и данных измерений за 2016 г. в точке 71° с.ш., 73.56° в.д. (h – средняя высота волны, Date – дата измерения в формате месяц/день/год).

Fig. 6. Comparison of calculated time series and measurement data for 2016 at 71° N, 73.56° E (h – average wave height, Date – measurement date in the format month/day/year).

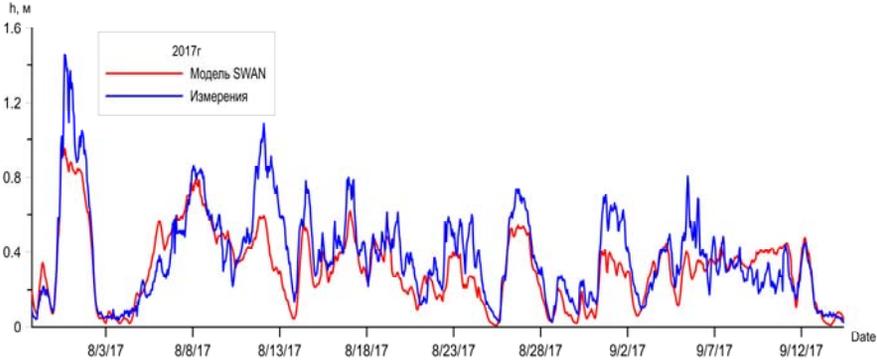


Рис. 7. Сопоставление расчетных временных рядов и данных измерений за 2017 г. в точке 71° с. ш., 73.56° в. д. (h – средняя высота волны, Date – дата измерения в формате месяц/день/год).

Fig. 7. Comparison of calculated time series and measurement data for 2017/ at 71° N, 73.56° E (h – average wave height, Date – measurement date in the format month/day/year).

При верификации модели SWAN по данным инструментальных наблюдений рассматривались следующие статистические параметры:

$$\text{BIAS} = \frac{\sum_1^n (H_{1,i} - H_{2,i})}{n}; \quad \text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_1^n (H_{1,i} - H_{2,i})^2}{n}};$$

$$\text{SI} = \sqrt{\frac{\sum_1^n [(H_{1,i} - \overline{H}_1) - (H_{2,i} - \overline{H}_2)]^2}{\sum_1^n H_{2,i}^2}};$$

$$R = \frac{\sum_1^n (H_{1,i} - \overline{H}_1)(H_{2,i} - \overline{H}_2)}{\sqrt{\sum_1^n (H_{1,i} - \overline{H}_1)^2 \sum_1^n (H_{2,i} - \overline{H}_2)^2}},$$

где BIAS – систематическая ошибка; RMSE – среднеквадратическая ошибка; SI – индекс рассеяния; R – коэффициент корреляции; H_1 , \overline{H}_1 – высота средних волн и среднее значение средних волн по расчетным данным модели; H_2 , \overline{H}_2 – высота средних волн и среднее значение средних волн по данным наблюдений.

Следуя работе [12] добавим в рассмотрение скорректированную среднеквадратическую ошибку

$$\text{RMSEc} = \sqrt{\frac{\sum_1^n (H_{1,i} - H_{2,i})^2}{\sum_1^n H_{1,i} H_{2,i}}}.$$

В [14] показано, что во многих случаях скорректированное среднеквадратическое отклонение обеспечивает более достоверную информацию о точности результатов численных моделей, поскольку этот параметр

убывает при стремлении систематической ошибки (BIAS) к нулю, и возрастает при увеличении модуля систематической ошибки.

В таблице представлены описанные выше статистические параметры сравнения результатов расчетов и инструментальных наблюдений за 2015, 2016 и 2017 годы.

Таблица. Статистические параметры сравнения расчетных средних высот волн с данными измерений

Table. Statistical parameters for comparing calculated average wave heights with measurement data

Год	R	BIAS	RMSE	SI	RMSEc
2015	0.88	-0.04	0.11	0.25	0.28
2016	0.82	-0.06	0.17	0.36	0.43
2017	0.84	-0.07	0.15	0.29	0.36
Среднее	0.85	-0.05	0.15	0.30	0.36

Заключение

Результаты сопоставления данных измерений и данных расчета ветрового волнения моделью SWAN показывают, что модельные данные хорошо согласуются с наблюдениями. Следует отметить высокий коэффициент корреляции (0,85) и низкое значение среднеквадратической отклонения (0,15). Полученные оценки соответствуют нормативам оправдываемости по Наставлению [7]. Качество модельных расчетов очень сильно зависит от точности батиметрии и разрешения входных данных о характеристиках ветра и льда. Таким образом, при доступности достаточно подробной карты льда и качественных данных о ветре, возможно увеличение точности модельных расчетов. Так, для получения полей ветра более высокого разрешения целесообразно использовать региональную ветровую модель, калиброванную по доступным данным метеостанций.

Итогом верификации является заключение о пригодности модели SWAN с указанными параметрами для расчета волнения в акватории Обской губы и о целесообразности использования этой модели на данной акватории.

Список литературы

1. Давидан И.Н., Лавренов И.В., Пасечник Т.А. и др. Математическая модель и метод оперативных расчетов ветрового волнения на морях СССР // Метеорология и гидрология. 1988. № 11. С. 81-90.

2. Дымов В.И., Пасечник Т.А., Лавренов И.В., Давидан И.Н., Абузаров З.К. Сопоставление результатов расчетов современных моделей ветрового волнения с данными натурных измерений // Метеорология и гидрология. 2004. №7. С. 87-94.

3. Давидан И.Н., Давидан Г.И., Дымов В.И., Пасечник Т.А. Модифицированная версия спектрально-параметрической модели ветрового волнения и результаты ее верификации // Известия РГО. 2010. Т. 142. Вып. 2. С. 31-39.
4. Лавренов И.В. Математическое моделирование ветрового волнения в пространственно-неоднородном океане. СПб.: Гидрометеиздат, 1998. 500 с.
5. Нестеров Е.С., Абузаров З.К., Григорьева Г.А., Давидан И.Н., Дымов В.И., Пасечник Т.А. Оценка точности расчета смешанного волнения в океане по современным численным моделям // Метеорология и гидрология. 2011. № 10. С. 44-52.
6. Режим, диагноз и прогноз ветрового волнения в океанах и морях / Под ред. Е.С. Нестерова. М., 2013. 295 с. Раздел 7.7. Дымов В.И. Спектрально-параметрическая модель AARI-PD2 (глобальная версия). С. 129-138. Раздел 8.5. Особенности режима ветрового волнения в арктических морях. С. 195-197.
7. РД 52.27.759-2011. Наставление по службе прогнозов. Раздел 3. Часть III. Служба морских гидрологических прогнозов. М.: ТРИАДА ЛТД, 2011. 202 с.
8. Hendrik L. Tolman. User manual and system documentation of WAVEWATCH-III version 1.18, 1999. 110 p.
9. Tolman H.L. User manual and system documentation of WAVEWATCH-III version 2.22. NOAA/NWS/NCEP/MMAB Tech. Note 222, 2002. 133 p.
10. Tolman H.L. Development of a multi-grid version of WAVEWATCH III, NOAA/NWS/NCEP/EMC/MMAB Tech. Note 256, 2007.
11. Tolman H.L. User manual and system documentation of WAVEWATCH III version 3.14. NOAA/NWS/NCEP/EMC/MMAB Tech. Note 277, 2009.
12. The WAM-model- a third generation ocean wave prediction model // J. Phys. Oceanogr., 1988. Vol. 12. P. 1775-1810
13. Komen G.J., Cavaleri L., Donelan M., Hasselmann K., Hasselmann S., Janssen P.A.E.M. Dynamics and Modeling of Ocean Waves. Cambridge: University Press, 1994. 532 p.
14. Mentaschi L., Besio G., Cassola F., Mazzino A. Problems in RMSE-based wave model validations // Ocean Modeling. 2013. Vol. 72, no. 1. P. 53-58.

References

1. Davidan I.N., Lavrenov I.V., Pasechnik T.A. et al. Matematicheskaya model' i metod operativnyh raschetov vetrovogo volneniya na moryah SSSR. *Meteorologiya i Gidrologiya* [Russ. Meteorol. Hydrol.], 1988, no. 11, pp. 81-90 [in Russ.].
2. Dymov V.I., Pasechnik T.A., Lavrenov I.V., Davydan I.N., Abuzyarov Z.K. Comparison of Modern Wind-Wave Model Results with Field Measurements. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2004, no. 7, pp. 67-73.
3. Davidan I.N., Davidan G.I., Dymov V.I., Pasechnik T.A. Modificirovannaya versiya spektral'no-parametricheskoy modeli vetrovogo volneniya i rezul'taty ee verifikacii. *Izvestiya RGO*, 2010, vol. 142, no. 2, pp. 31-39 [in Russ.].
4. Lavrenov I.V. Matematicheskoe modelirovanie vetrovogo volneniya v prostranstvenno-neodnorodnom okeane. Saint Petersburg, Gidrometeoizdat publ., 1998, 500 p. [in Russ.].
5. Nesterov E.S., Abuzyarov Z.K., Grigor'eva G.A. et al. Estimating the computation accuracy of mixed waves in the ocean on the basis of present-day numerical models. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2011, vol. 36, no. 10, pp. 669-676. DOI: 10.3103/S1068373911100049.
6. Rezhim, diagnoz i prognoz vetrovogo volneniya v okeanah i moryah / Pod red. E.S. Nesterova. М., 2013. 295 s. Razdel 7.7. Dymov V.I. Spektral'no-parametricheskaya model' AARI-PD2 (global'naya versiya). pp. 129-138. Razdel 8.5. Osobennosti rezhima vetrovogo volneniya v arkticheskikh moryah. pp. 195-197 [in Russ.].
7. RD 52.27.759-2011. Nastavlenie po sluzhbe prognozov. Razdel 3. CHast' III. Sluzhba morskikh gidrologicheskikh prognozov. Moscow: TRIADA LTD publ., 2011, 202 p.
8. Hendrik L. Tolman. User manual and system documentation of WAVEWATCH-III version 1.18, 1999, 110 p.
9. Tolman H.L. User manual and system documentation of WAVEWATCH-III version 2.22. NOAA/NWS/NCEP/MMAB Tech. Note 222, 2002, 133 p.

10. Tolman H.L. Development of a multi-grid version of WAVEWATCH III, NOAA/NWS/NCEP/EMC/MMAB Tech. Note 256, 2007.
11. Tolman H.L. User manual and system documentation of WAVEWATCH III version 3.14. NOAA/NWS/NCEP/EMC/MMAB Tech. Note 277, 2009.
12. The WAM-model- a third generation ocean wave prediction model. *J. Phys. Oceanogr.*, 1988, vol. 12, pp. 1775-1810.
13. Komen G.J., Cavaleri L., Donelan M., Hasselmann K., Hasselmann S., Janssen P.A.E.M. Dynamics and Modeling of Ocean Waves. Cambridge: University Press, 1994, 532 p.
14. Mentaschi L., Besio G., Cassola F., Mazzino A. Problems in RMSE-based wave model validations. *Ocean Modeling*, 2013, vol. 72, no. 1, pp. 53-58.

Поступила в редакцию 18.03.2020 г.

Received by the editor 18.03.2020.