

## Особенности подхода к расчету режима ветрового волнения Каспийского моря

Л. И. Лопатухин<sup>\* \*\*</sup>, Н. А. Яицкая<sup>\*\*\* · \*\*\*\* · \*\*\*\*\*</sup>

*Создана высокоточная цифровая модель рельефа дна Каспийского моря с пространственным разрешением 0,001–0,001°, используемая в качестве основы для расчетных сеток разного масштаба. Разработана трехуровневая схема расчета ветрового волнения с последовательным вложением сеток (Каспийское море — Северный Каспий, Апшеронский п-ов, г. Туркменбаши — ключевые участки Северного Каспия). Реализован конструктор сценариев, позволяющий при расчетах учитывать положение кромки льда и динамику береговой линии. Спектральная волновая модель SWAN адаптирована к условиям Каспийского моря. Выполнена серия расчетов, проведено сравнение полученных результатов с данными наблюдений. Установлено, что наилучший результат получен при использовании в расчетах откорректированных данных реанализа.*

**Ключевые слова:** Каспийское море, режим волнения, гидродинамическая модель, адаптация модели.

### 1. Введение

В настоящее время в мировой практике для расчета волнового климата используется концепция определения режимных характеристик волнения в районах, мало освещенных наблюдениями. В ее основе лежит подход, базирующийся на получении режимных сведений путем расчетов волнения с помощью гидродинамических моделей. Указанный подход получил наибольшее распространение в мире, в том числе в России, был признан, одобрен и реализован при решении многочисленных научных и прикладных задач [9]. Подтверждением его применимости является публикация Российским морским регистром судоходства справочников нового поколения по режиму ветра и волнения на морях [3, 7].

Принципиальная схема расчета режима волнения (волнового климата) включает следующие основные этапы: подготовка входной информации (батиметрия, поля ветра); расчет (hindcasting) волнения по гидродинамической модели; обобщение результатов расчетов спектров волнения посред-

\* Санкт-Петербургский государственный университет.

\*\* Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики.

\*\*\* Южный научный центр Российской академии наук.

\*\*\*\* Сочинский научно-исследовательский центр Российской академии наук.

\*\*\*\*\* Филиал Института природно-технических систем; e-mail: yaitskayan@gmail.com.

ством вероятностных моделей. Каждый этап может быть подразделен на разное число ступеней [6]. В настоящей статье рассмотрена проблема входных данных и адаптации гидродинамической модели для акватории Каспийского моря.

## 2. Гидродинамические модели, используемые для расчетов волнения

Для описания зависимости ветрового волнения от условий волнообразования используется уравнение эволюции спектральной плотности волнового действия  $N$  в следующем виде [14]:

$$\frac{N}{t} = \frac{N}{t} \cdot \frac{N}{k} \cdot \frac{N}{k} \cdot \frac{N}{k} \cdot \frac{N}{k} \cdot G_s, \quad (1)$$

где  $N$  является функцией от широты  $\varphi$ , долготы  $\lambda$ , волнового числа  $k$  и угла  $\theta$  между направлением волнового вектора и параллелью, а также от частоты  $\omega$  и времени  $t$  (символ “точка” над переменными означает производную по времени). Функция источника  $G_s$  записывается в виде суммы трех основных компонентов:

$$G_s = G_{in} + G_{nl} + G_{ds}, \quad (2)$$

где  $G_{in}$  — поступление энергии от ветра к волнам;  $G_{nl}$  — слабонелинейное взаимодействие в спектре ветрового волнения;  $G_{ds}$  — диссипация волновой энергии.

Гидродинамические модели, основанные на численном интегрировании уравнения (1), позволяют по заданному полю ветра (атмосферного давления) вычислить частотно-направленный спектр волн  $S(\omega, \theta)$  в узлах сеточной области в разные моменты времени (синоптические сроки). Переход к параметрам видимых волн (высоте, периоду, длине и т. п.) осуществляется через моменты спектра. Существующие в настоящее время модели волнения в спектральной форме различаются в основном формой представления функции источника (2) и методами численной реализации решения уравнения (1). Все модели можно разделить на три большие группы: интегральные (или I поколения); спектральные параметрические (II поколения); спектральные непараметрические (III и IV поколений).

Интегральными моделями, в частности, можно считать полуэмпирические соотношения между скоростью ветра и элементами видимых волн, принятые в различных руководствах по расчету волнения, Строительных нормах и правилах (СНиП) и т. д.

Параметрические спектральные модели основаны на сведении уравнения (1) к системе более простых дифференциальных уравнений в частных производных относительно параметров результирующего спектра. Параметрические модели при описании спектра волнения рассматривают не каждую гармонику отдельно, а сразу несколько параметров, аппроксимирующих спектр. В зависимости от числа параметров модели могут быть шести-, пяти- и даже однопараметрические. В этих моделях решается система уравнений в частных производных для параметров спектра. Преимущество параметрических моделей заключается в скорости реализации расчетов, однако по мере развития вычислительной техники параметрические модели постепенно устаревают. Спектральные непараметрические модели

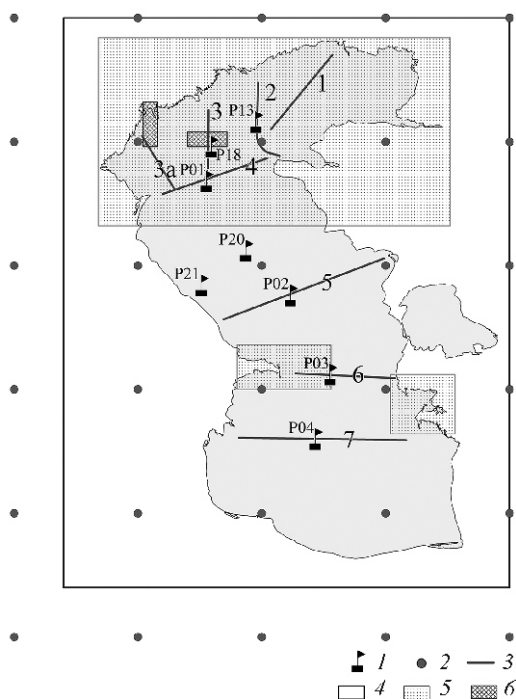


Рис. 1. Схема расчетных сеток в Каспийском море, положение “вековых” разрезов и реперных точек.

1 — ключевые точки; 2 — реанализ NCEP/NCAR; 3 — “вековые разрезы”; расчетные сеточные области: 4 — I уровень (0,1 0,1 ); 5 — II уровень (0,01 0,01 ); 6 — III уровень (0,001 0,001 ).

основываются на непосредственном численном интегрировании уравнения (1) для дискретных значений частоты и направления (с этим связано их альтернативное название — дискретные спектральные модели). В основном они отличаются степенью подробности описания нелинейных взаимодействий и применяемой численной схемой. В настоящее время чаще всего используются три международных модели: Wave Watch (WW), Wave Model (WAM), а также для мелководных водоемов — модель Simulating Waves Near Shore (SWAN, разработана в Делфтском технологическом университете в Нидерландах). Модели находятся в свободном доступе, открыты для широкого круга пользователей Интернета и успешно применяются для диагноза и прогноза волнения в разных районах океанов и морей. Для оценки параметров волнения Каспийского моря использована нелинейная нестационарная численная гидродинамическая модель SWAN (версия 41.01A). Эта модель признана международной общественностью, опробована на разных природных объектах и в течение многих лет применяется для расчетов волнения; базируется на численном решении уравнения (1), при этом можно использовать и декартовы, и сферические координаты. В модели можно проводить расчет для последовательности вложенных сеток: сначала выполняется расчет волнения на грубой сетке для большой акватории, затем для меньшей акватории проводятся вычисления на более подробной сетке (рис. 1).

### 3. Исходные данные для расчетов по модели SWAN

До выполнения расчетов необходимо подготовить карту глубин (batimетрическую основу), а для Северного Каспия — сведения о ледовых полях. Расчеты по модели выполняются с учетом этой информации. Входными данными для расчета ветрового волнения являются поля ветра.

#### 3.1. Батиметрическая основа для расчетов волнения

Информационной основой создания цифровой модели рельефа дна стала геоинформационная система (ГИС) “Каспийское море” [10, 11]. ГИС

содержит 19 карт Управления навигации и океанографии Министерства обороны РФ масштаба 1:750 000, 1:200 000, 1:100 000, 1:50 000, опубликованных в 1992—2009 гг. при современном среднем положении уровня моря  $-27$  м в Балтийской системе высот. Всего оцифровано около 30 000 отметок глубин и основных изобат. На основе цифровой модели рельефа для среднего многолетнего положения уровня моря разработаны сеточные области для четырех сценариев изменения уровня Каспийского моря с 1948 по 2015 г.:  $-28,4$  м (1948—1970 гг.),  $-28,8$  м (1971—1980 гг.),  $-27,6$  м (1981—1996 гг.),  $-27$  м (1997—2015 гг.).

### 3.2. Ледовые поверхности

Исходной в пространственном распределении льда в Каспийском море является ГИС “Ледовый режим южных морей России” [8, 12, 15]. Источники данных — космические снимки (собственные данные Южного научного центра Российской академии наук, Арктического и антарктического научно-исследовательского института, Научно-исследовательского центра космической гидрометеорологии “Планета”) и картосхемы облетов (Ежегодные данные о режиме и качестве вод морей и морских устьев рек и Морские гидрометеорологические ежегодники). По Каспийскому морю в ГИС накоплена картографическая информация с 1950 по 2016 г. (531 картосхема).

Учет динамики береговой линии, морфометрии и ледового покрова при расчетах выполнялся с помощью специального программного модуля — конструктора сценариев. Модуль в автоматическом режиме считывает информацию из ГИС “Ледовый режим” и ГИС “Каспийское море”. Принцип учета динамики береговой линии и морфометрии следующий: при изменении среднего уровня моря в соответствии с выбранными четырьмя сценариями расчета модуль автоматически заменяет расчетную сетку, заготовленную заранее. Ледовый покров при моделировании учитывается аналогично: с наступлением очередного зимнего ледового периода модуль последовательно считывает данные о ледовых поверхностях в течение каждого года и ограничивает расчетную область до кромки льда. Таким образом, в отличие от ранее выполненных расчетов волнения при средней климатической кромке льда [9] вычисления проводили с учетом фактического ледового покрова для каждого месяца конкретного года. Дискретизация расчетов по времени составляет 15 мин, они выполнены за 67 лет (с 1948 по 2015 г.) для всех синоптических сроков (при дискретности 3 ч, т. е. 195 640 сроков). На каждом временном шаге в каждой ячейке сетки рассчитывался обширный набор параметров, из которых в дальнейшем были использованы значительная высота волн, их средняя длина и средний период.

### 3.3. Входные данные для расчетов

Возможности модельных расчетов волнения за длительные промежутки времени (годы и десятилетия) существенно расширились после выполнения ресурсоемких международных и национальных проектов по реанализу

метеорологических данных. Под реанализом понимается воспроизведение массивов гидрометеорологических полей на регулярной сетке путем усвоения данных наблюдений в расчетах по диагностической модели. Наибольшую известность получил проект, выполненный в 1991—1996 гг. в США организациями NCEP (National Center for Environmental Prediction) и NCAR (National Center of Atmospheric Research) [13]. Массив реанализа NCEP/NCAR содержит доступные данные с 1948 г. по настоящее время. Изначально реанализ предназначался для использования в глобальных моделях исследований изменчивости климата. Применительно к расчетам режима волнения данные реанализа могут требовать уточнения и корректировки [2, 4]. Необходимость корректировки данных реанализа (независимо от их происхождения) при расчетах волнения обсуждалась на международных форумах (например, на Международном семинаре по ретроспективному анализу и прогнозированию волн, проходившем в США в 2000 г. и в 2004 г., в Канаде в 2002 г.), имеются публикации применительно к отдельным акваториям.

#### 4. Результаты расчетов

Любая гидродинамическая модель является универсальным средством, поэтому необходима ее адаптация для конкретной акватории. Для адаптации модели SWAN к условиям Каспийского моря проведена серия экспериментов по расчету волнения с разными параметрами, полученные результаты сопоставлены с данными измерений. При выполнении расчетов учитывалось, что наибольшее влияние на результаты оказывают входные данные о ветре, а также значения коэффициента трения и параметра обрушения волн (параметр  $G_{ds}$  из правой части уравнения (1), учитывающий забурунивание (whitescapping)).

В настоящей статье из-за ограничений на объем приведены результаты одного из экспериментов (рис. 2). На рисунке видно, что наилучший результат достигается при включенном параметре whitescapping (учет диссипации из-за забурунивания) и откорректированных данных о ветре.

Режим ветрового волнения в глубоководных районах моря в первую очередь зависит от скорости и преобладающего направления ветра. В прибрежной зоне и на мелководье существенное влияние оказывают глубина места и форма береговой черты.

В таблице приведены результаты расчетов волнения для некоторых точек акватории Каспийского моря (показаны на рис. 1). Необходимо отметить, что значения параметров, представленные в таблице, относятся к фоновым условиям режима волнения. Оценки высоты, периода и длины волн получены при современном среднем положении уровня моря  $-27$  м. Изменение среднего уровня по-разному влияет на режим волнения в отдельных частях акватории. В работе [5] приведены разные сценарии изменения уровня моря, в том числе до 2050 г. Согласно данному в этой работе прогнозу, уровень Каспийского моря не превысит отметки  $-25$  м и не опустится ниже  $-29$  м. Очевидно, что в первом случае для Северного Каспия оценки высоты волн могут увеличиться на несколько процентов, а во втором — уменьшиться. В Среднем и Южном Каспии существенные изменения в режиме волнения вряд ли произойдут.

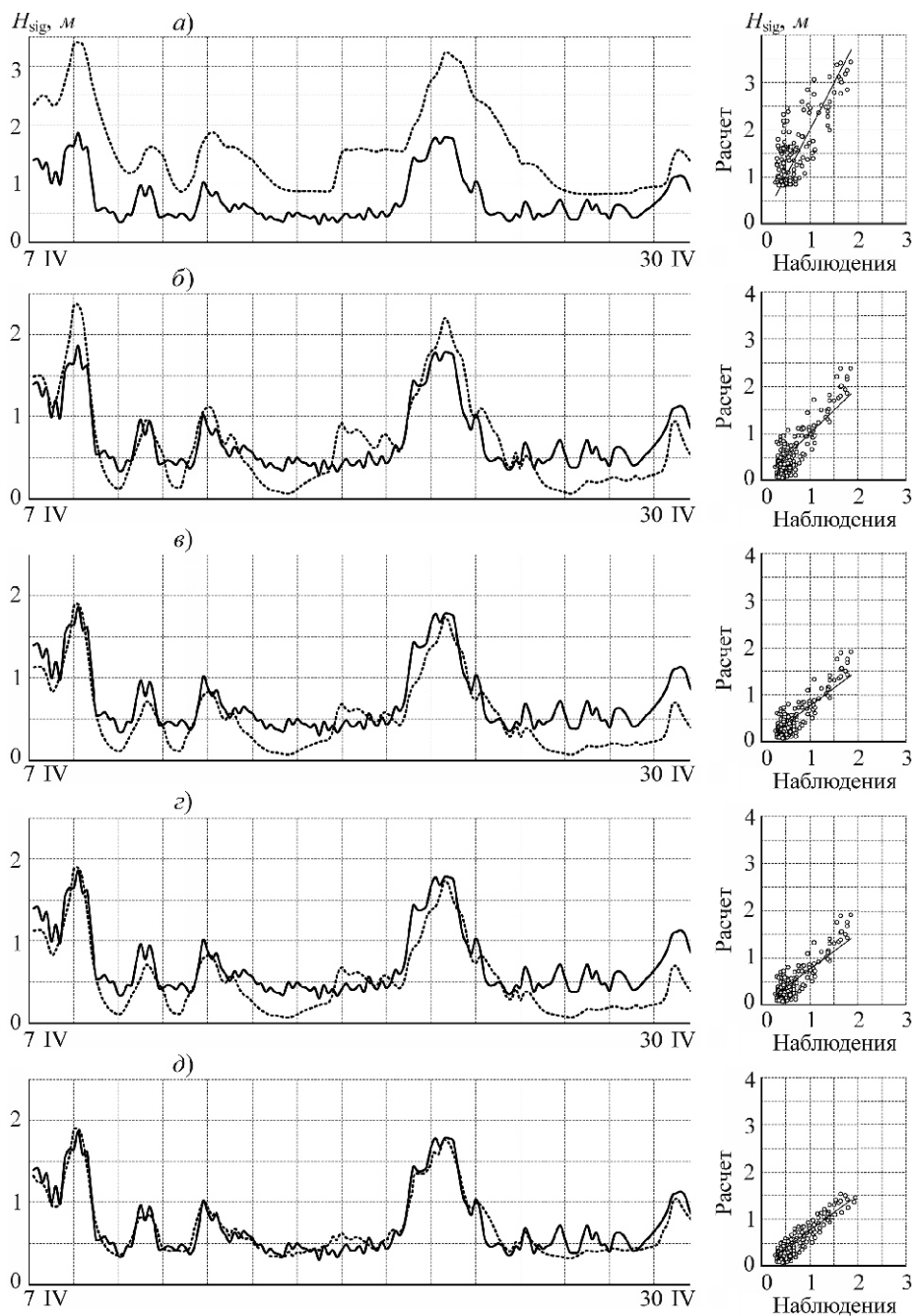


Рис. 2. Сопоставление данных измерений в апреле 2002 г. на Северном Каспии в районе месторождения Ракушечная (сплошная линия) и результатов расчетов высоты значительных волн  $H_{sig}$  по модели SWAN (пунктирная линия).

*а, б* — расчет с параметрами модели по умолчанию без коррекции данных реанализа ветра, шаг по времени соответственно — 1 ч и 15 мин; *в*) расчет с параметрами модели по умолчанию с откорректированными данными реанализа ветра; *г*) расчет без учета диссипации из-за забуривания (параметр whitecapping) с откорректированными данными реанализа ветра; *д*) расчет при частичном учете диссипации из-за забуривания и откорректированными данными реанализа; для вариантов расчета *в—д* шаг по времени — 15 мин.  $R^2$  составляет: *а*) 0,53; *б*) 0,73; *в*) 0,74; *г*) 0,84.

**Оценки среднемесячных параметров волнения  
для отдельных районов Каспийского моря**

Месяц	P01, 44,2 с. ш., 48,9 в. д.			P02, 41,9 с. ш., 50,6 в. д.			P03, 40,3 с. ш., 51,4 в. д.		
	<i>H, м</i>	<i>L, м</i>	<i>T, с</i>	<i>H, м</i>	<i>L, м</i>	<i>T, с</i>	<i>H, м</i>	<i>L, м</i>	<i>T, с</i>
I	0,82	17,63	3,99	0,84	18,55	4,10	0,80	18,93	4,19
II	0,85	17,93	4,01	0,85	18,60	4,10	0,78	18,13	4,12
III	0,76	16,24	3,84	0,74	16,16	13,85	0,68	15,62	3,84
IV	0,67	14,27	3,59	0,63	14,02	3,60	0,56	13,26	3,58
V	0,56	12,01	3,31	0,55	12,24	3,37	0,50	11,63	3,38
VI	0,46	9,79	3,00	0,58	12,72	3,45	0,57	12,90	3,57
VII	0,40	8,34	2,79	0,57	12,35	3,40	0,59	13,02	3,59
VIII	0,49	10,26	3,08	0,59	12,46	3,39	0,58	12,70	3,53
IX	0,63	13,45	3,51	0,69	14,59	3,65	0,69	14,54	3,70
X	0,74	16,05	3,83	0,75	16,15	3,83	0,74	15,78	3,82
XI	0,81	17,46	3,98	0,84	18,21	4,04	0,80	17,80	4,03
XII	0,84	17,92	4,02	0,84	18,46	4,09	0,80	18,42	4,14
Год	0,67	14,28	3,58	0,71	15,38	3,74	0,40	6,81	2,47

*Примечание.* *H, L,* — соответственно высота, длина, период волн.

При расчетах экстремального волнения, особенно в мелководном Северном Каспии, необходим совместный расчет уровня моря во время конкретного шторма и, соответственно, расчет волнения при полученных оценках глубины моря на рассматриваемой акватории. Оценки экстремального волнения и его статистика (включая периоды повторяемости до 100 лет и более) выходят за рамки настоящей статьи.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-35-50079 мол\_нр и № 16-35-60046 мол\_а\_дк.

**Литература**

- Амбросимов С. А., Амбросимов Е. С.** Экспериментальные исследования ветрового волнения в центральной части Каспийского моря. — Инженерная физика, 2007, № 6, с. 41—47.
- Бухановский А. В., Иванов С. В., Лопатухин Л. И.** Подходы, опыт и некоторые результаты исследований волнового климата океанов и морей. — Вестник Санкт-Петербургского университета, серия 7. Геология. География, 2005, № 3, с. 62—74.
- Бухановский А. В., Лопатухин Л. И., Чернышева Е. С.** Новое поколение справочников по режиму волнения морей. — Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства, 2011, вып. 34, с. 50—65.
- Бухановский А. В., Лопатухин Л. И., Чернышева Е. С., Колесов А. М.** Шторм на Черном море 11 ноября 2007 г. и статистики экстремальных штормов моря. — Известия Русского географического общества, 2009, вып. 2, с. 71—84.
- Водный баланс и колебания уровня Каспийского моря.** Моделирование и прогноз. — М., Триада лтд, 2016, 378 с.
- Лопатухин Л. И.** Ветровое волнение. /Учебное пособие. 2-е дополненное издание. — СПб, Изд-во Санкт-Петербургского государственного ун-та, 2012, 165 с.
- Лопатухин Л. И., Бухановский А. В., Дегтярев А. Б., Рожков В. А.** Справочные данные по режиму ветра и волнения Баренцева, Охотского и Каспийского морей. — СПб, Российский морской регистр судоходства, 2003, 213 с.

- 8. Магаева А. А., Яицкая Н. А., Лихтанская Н. В., Дашкевич Л. В.** Развитие геоинформационной системы ледового режима южных морей России. — Экология, экономика, информатика, 2015, т. 3, с. 269—275.
- 9. Мирзоев Д. А., Зильберштейн О. И., Лопатухин Л. И., Миронов Е. У., Михайлов Н. Н.** Концепция обеспечения специализированной гидрометеорологической информацией проектирования сооружений на шельфе арктических морей. /В кн.: Труды Четвертой Международной конференции “Освоение шельфа арктических морей. RAO-99”. — СПб, 1999, ч. 1, с. 311—318.
- 10. Яицкая Н. А.** Термохалинный режим Каспийского моря при изменении уровня. /Автореферат диссертации канд. геогр. наук. — Мурманск, 2012, 28 с.
- 11. Яицкая Н. А., Лошинская В. В.** Создание геоинформационной системы южных морей России для сохранения исторической картографической информации. — Экология, экономика, информатика, 2013, т. 2, с. 211—217.
- 12. Berdnikov S., Yaitskaya N., and Lychagina Yu.** The study of ice conditions of the Caspian Sea using satellite monitoring data (2008—2011). /In: Proceedings of the Fourth International Conference on Environmental Management, Engineering, Planning and Economics (CEMEPE 2013) and SECOTOX Conference. — 2013, pp. 855—859.
- 13. Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R., Collins W., Deaven D., Gandin L., Iredell M., Saha S., White G., Woollen J., Zhu Y., Leetmaa A., and Reynolds R.** The NCEP/NCAR 40-year Reanalysis Project. — Bull. Amer. Meteorol. Soc., 1996, vol. 77, pp. 437—470.
- 14. SWAN.** Technical Documentation. — Delft University of Technology, Faculty of Civil Eng. and Geosciences, Environmental Fluid Mechanics Section. — 2006, 88 p.
- 15. Yaitskaya N., Lychagina Y., and Berdnikov S.** The ice conditions study of the Caspian Sea during the winter periods 2008—2010 using satellite monitoring data and geographical information system. — Fresenius Environ. Bull., 2014, vol. 23, No. 11, pp. 2771—2777.

Поступила в редакцию 14 II 2017 г., после доработки 3 V 2017 г.

#### PECULIARITIES OF THE APPROACH TO CALCULATION OF WIND WAVES IN THE CASPIAN SEA

L. I. Lopatukhin and N. A. Yaitskaya

*A high-precision digital elevation model of the Caspian Sea with the spatial resolution of 0.001 0.001° is constructed and used as a basis for computation grids of various scales. A three-level scheme for calculating wind waves with the sequence of nested grids (Caspian Sea–Northern Caspian, Absheron Peninsula, Turkmenbasy city–key areas of the Northern Caspian) is developed. A scenario designer is implemented which allows taking into account the position of the ice edge and the coastline dynamics for calculations. The SWAN spectral wave model is adapted to the Caspian Sea conditions. The series of calculations and the comparison of the obtained results with observational data are provided. It is found that the best result is obtained when corrected reanalysis data are used for calculations.*