

## МОДЕЛИРОВАНИЕ УРОВНЯ В КАЗАХСТАНСКОЙ ЧАСТИ КАСПИЙСКОГО МОРЯ С ПОМОЩЬЮ МОДЕЛИ MIKE 21

А.Г. Елтай<sup>1</sup>, Н.И. Ивкина<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> РГП «Казгидромет», Научно-исследовательский центр, управление гидрометеорологических исследований Каспийского моря

<sup>1</sup> Казахский национальный университет имени аль-Фараби, факультет географии и природопользования, кафедра метеорологии и гидрологии

<sup>1</sup> Вед. науч. сотр., докторант; e-mail: eltai\_a@meteo.kz

<sup>2</sup> Начальник управления, канд. геогр. наук; e-mail: n\_ivkina@mail.ru

В работе приведены результаты адаптации гидродинамического модуля MIKE 21 Flow Model FM программного комплекса MIKE Zero к региону Каспийского моря с применением данных реанализа полей ветра и давления как за отдельные годы, так и за многолетний период 2000–2020 гг. Проведена оценка качества результатов моделирования с применением статистических методов. Коэффициент корреляции между наблюдаемыми и смоделированными уровнями воды за период 2000–2020 гг. составил 0,97 для Форт-Шевченко и 0,95 для Актау. Калибровка модели дала возможность получить оптимальные значения параметров модели. Так, коэффициент турбулентной вязкости Смагоринского равен 0,5, коэффициент шероховатости Маннинга – 0,031. Проведенные оценки, как для многолетнего периода, так и для отдельных случаев, показали, что критерии качества моделирования находятся в допустимых пределах. Результаты верификации модели по данным 2000–2020 гг. и ее тестирования для штормового нагона 5–7 марта 2022 г. показали, что в будущем программный комплекс MIKE Zero может применяться для выпуска оперативного прогноза уровня моря.

**Ключевые слова:** гидродинамика, гидродинамическая модель MIKE21 Flow Model FM

DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.79.2.7

### ВВЕДЕНИЕ

Каспийское море – крупнейший бессточный водоем мира. Исследуемый район, северо-восточная часть, особенно ее прибрежная зона, характеризуется тем, что, в отличие от остальной части моря, здесь происходили и происходят наиболее существенные изменения гидролого-морфологических процессов. В этом районе, в среднем, в месяц отмечается 3–4 нагона и 4–5 сгонов во все сезоны года, поэтому 80–85% времени года береговая линия практически все время мигрирует [Гидрометеорология и гидрохимия морей..., 1992]. Одной из основных особенностей гидролого-морфологических процессов у побережья Каспийского моря является то, что они происходят в условиях значительных изменений фонового уровня моря [Ивкина, 2013]. Повышение уровня моря у побережья представляет серьезную угрозу для населения, предприятий, животного мира и является одной из актуальных тем для исследования [Kulp, Strauss, 2019; Hermans, 2022; Нестеров, 2016]. Кроме того, прибрежная зона имеет большое социально-экономическое значение, так как перспективы развития Западного Казахстана во многом определяются разведанными и прогнозными запасами углеводородного сырья в подсолевых

отложениях Прикаспийской впадины, включая дно Каспийского моря, и в ее северных и восточных частях [Ахмадиев, Брылов, 2020]. Немаловажное значение колебания уровня моря представляют для водотранспортной инфраструктуры. В казахстанской глубоководной части Каспийского моря на данный момент функционируют порты Баутино, Актау и Курык, построенные в 1960, 1963 и 2014 гг. соответственно. Порт Баутино расположен в Тупкараганском заливе и позиционируется как база поддержки морских операций в рамках освоения казахстанского сектора Каспийского моря. Порт Актау обеспечивает перевозку грузов, нефти и нефтепродуктов в направлении Исламской Республики Иран, Турции, Российской Федерации, Азербайджанской Республики, Туркменистана [Порт Актау, 2022]. Порт Курык расположен в естественной бухте, в заливе и круглогодично принимает автомобильные и железнодорожные паромы [Порт Курык, 2022].

Между тем число пунктов на казахстанском побережье, в которых проводятся наблюдения за уровнем моря, не только крайне ограничено, но ни на одном из них не установлено автоматических регистраторов уровня воды, которые обеспечивали бы удовлетворительную дискретность измерений во времени.

Наблюдения на работающих гидрометеорологических станциях выполняются только четыре раза в сутки. В подобных условиях велика вероятность того, что окажутся незафиксированными такие важнейшие характеристики уровня моря, как его экстремальные значения во время нагонных явлений.

В условиях недостатка данных наблюдений роль математического моделирования режима моря существенно возрастает, поскольку позволяет без значительных материальных затрат проводить численные эксперименты по прогнозу гидрологического состояния вод. В связи с этим целью данной работы является применение программного комплекса MIKE Zero для расчета уровневой поверхности казахстанской части Каспийского моря, для этого были выполнены задачи по трансформации батиметрической и метеорологической информации в форматы модели, проведены калибровка и верификация модели, а также дана оценка качества и эффективности результатов моделирования.

**МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ**

Для проведения исследований был использован программный комплекс MIKE Zero, который обладает огромными возможностями обработки данных для пространственно-временного численного моделирования, программный комплекс разработан в ДНИ [ДНИ, 2022] и адаптирован к условиям Каспийского моря специалистами РГП «Казгидромет» [Елтай и др., 2022].

Программный комплекс MIKE Zero включает несколько модулей: транспортный, MIKE ECO lab/разливы нефти, гидродинамический, транспорт наносов, спектральную модель волнения и др. [Luan, Tung, 2014]. Необходимо отметить, что гидродинамическое моделирование эффективно используется во многих методах прогноза колебания уровня моря [Любицкий и др., 2020; Symonds et al., 2017; Gurumoorthi, Venkatachalapathy, 2017; Nguyen et al., 2020; Hanapiah et al., 2020; MIKE 21..., 2017; Герштанский, 1978; Ивкина, Строева, 2006; Ивкина, 2007; Ivkina, Stroyeva, 2007; Йенсен и др., 2002; Филиппов, 1997].

При помощи численного моделирования можно провести расчет для любой точки на акватории моря. Для расчета уровня Каспийского моря использовался гидродинамический модуль MIKE 21 Flow Model FM программного комплекса MIKE Zero, основанный на решении трехмерных осреднений по Рейнольдсу уравнений Навье – Стокса, состоящих из уравнений неразрывности (1) и импульса (2, 3) [MIKE 21..., 2019]. Локальное уравнение неразрывности записывается как:

$$\frac{\delta u}{\delta x} + \frac{\delta v}{\delta y} + \frac{\delta w}{\delta z} = S. \tag{1}$$

Уравнение импульса в проекциях на оси  $x$  (2) и  $y$  (3):

$$\begin{aligned} & \frac{\delta u}{\delta t} + \frac{\delta u^2}{\delta x} + \frac{\delta v u}{\delta y} + \frac{\delta w u}{\delta z} = \\ & = f_v - g \frac{\delta \eta}{\delta x} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\delta p_a}{\delta x} - \frac{g}{\rho_0} \int_z^\eta \frac{\delta \rho}{\delta x} dz - \\ & - \frac{1}{\rho_0 h} \left( \frac{\delta S_{xx}}{\delta x} + \frac{\delta S_{xy}}{\delta y} \right) + \\ & + F_u + \frac{\delta}{\delta z} \left( v_t \frac{\delta u}{\delta z} \right) + u_s S, \\ & \frac{\delta v}{\delta t} + \frac{\delta v^2}{\delta y} + \frac{\delta u v}{\delta x} + \frac{\delta w v}{\delta z} = \\ & = -f_u - g \frac{\delta \eta}{\delta y} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\delta p_a}{\delta y} - \\ & - \frac{g}{\rho_0} \int_z^\eta \frac{\delta \rho}{\delta y} dz - \frac{1}{\rho_0 h} \left( \frac{\delta S_{yx}}{\delta x} + \frac{\delta S_{yy}}{\delta y} \right) + \\ & + F_v + \frac{\delta}{\delta z} \left( v_t \frac{\delta v}{\delta z} \right) + v_s S, \end{aligned} \tag{2}$$

$$\tag{3}$$

где  $u, v, w$  –  $x$ -,  $y$ -,  $z$ -компоненты вектора скорости,  $x, y, z$  – декартовы координаты,  $S$  – расход притока воды из источников,  $t$  – время,  $\eta$  – отклонение свободной поверхности от невозмущенного уровня,  $d$  – глубина при невозмущенном состоянии жидкости,  $h = \eta + d$  – полная глубина воды,  $f = 2\Omega \sin \Phi$  – параметр Кориолиса ( $\Omega$  – угловая скорость вращения Земли,  $\Phi$  – географическая широта),  $g$  – гравитация,  $\rho$  – плотность воды,  $S_{xx}, S_{xy}, S_{yx}, S_{yy}$  – компоненты тензора радиационных напряжений,  $v_t$  – вертикальная турбулентная (вихревая) вязкость,  $p_a$  – атмосферное давление.

Калибровочными параметрами гидродинамической модели являются:

- придонное напряжение или шероховатость дна, определяемые на основании квадратичного закона трения (выраженное через коэффициент Шези или число Маннинга);
- ветровое напряжение или трение ветра, определяемые на основании квадратичного закона скорости;
- турбулентность, рассчитываемая на основании концентрации вихревой вязкости (выражается через коэффициент Смагоринского).

На практике качество моделирования зависит во многом от точности используемых батиметрических данных, заданных начальных и граничных условий.

Основные калибровочные параметры модели – коэффициент шероховатости дна и коэффициент турбулентной вязкости – в программном комплек-

се могут быть заданы как пространственные, так и временные функции. Шероховатость дна учитывается посредством коэффициента шероховатости Маннинга, который изменяется в пределах от 0,01 до 0,2. Коэффициент турбулентной вязкости может изменяться во времени от 0,25 до 1, согласно особой формулировке теории турбулентности Смагоринского [Smagorinsky et al., 1965].

**Расчетная область.** Построение качественной расчетной сетки является важным шагом для получения достоверных и надежных результатов моделирования. В качестве основы для создания расчетной сетки всей акватории Каспийского моря принята ранее созданная батиметрическая модель [Ивкина и др., 1997; Ivkina, Stroyeva, 2007] с шагом сетки 10 км (рис. 1).

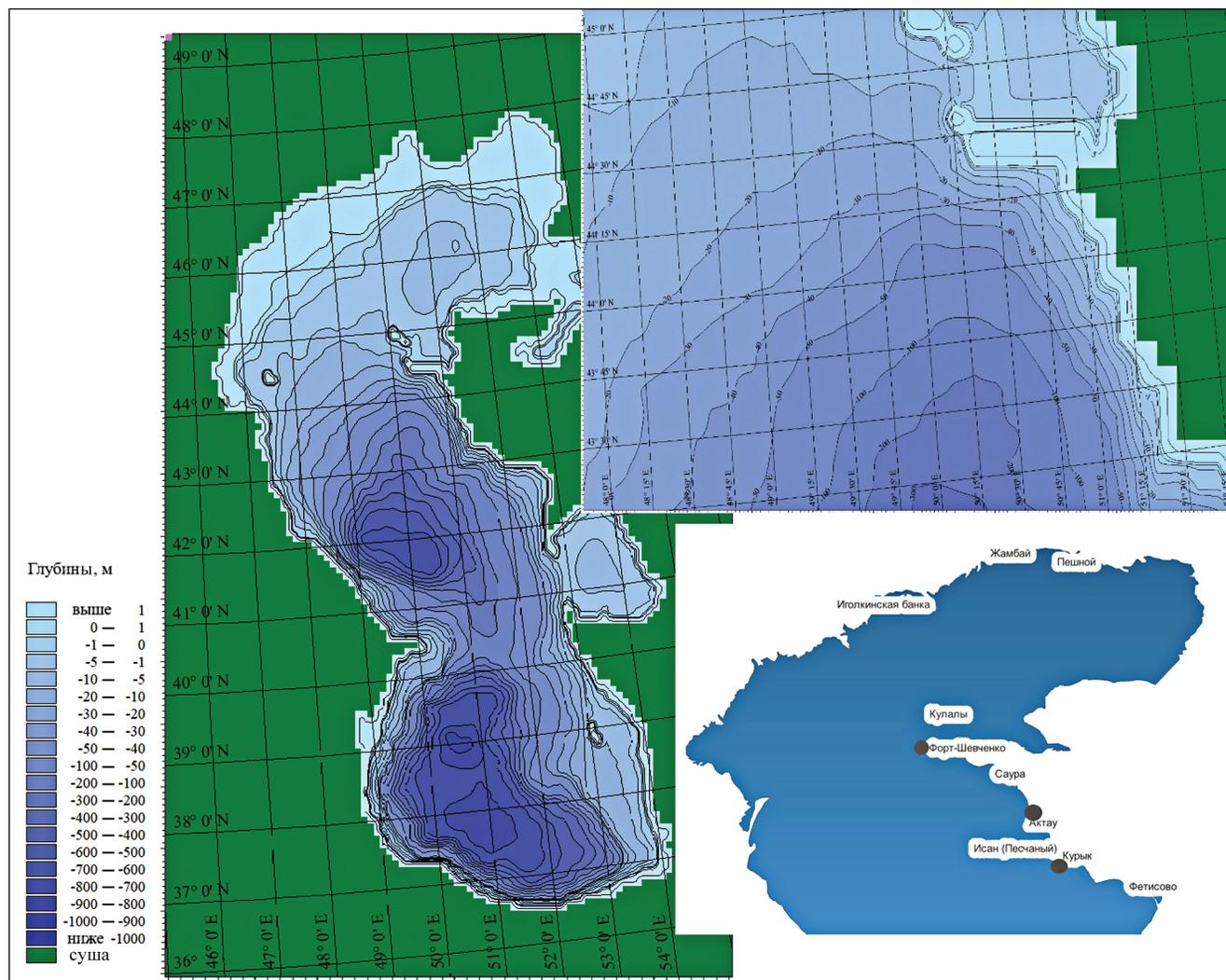


Рис. 1. Батиметрическая модель Каспийского моря с шагом сетки  $10 \times 10$  км

Fig. 1. Bathymetric model with a grid step of  $10 \times 10$  km

Для построения модельной батиметрической карты Каспийского моря были определены размер сетки модели, ее протяженность, ширина и ориентация. При изображении рельефа горизонталями особое внимание уделялось изгибам, которые должны характеризовать определенную форму рельефа и соответствовать его поперечному профилю. Чтобы иметь возможность соединить отдельные топографические карты, счет горизонталей велся от одной уровневой поверхности ( $-28,00$  м). Ме-

тодом интерполяции были скорректированы карты Каспийского моря масштаба  $1 : 500\,000$ . Эти и более крупного масштаба карты северной части Каспийского моря и Гурьевского фарватера оцифрованы, после чего создан файл с глубинами и высотными отметками в равноугольной цилиндрической проекции Меркатора. Поскольку физической поверхности Земли свойственна сложная форма; ее нельзя представить ни одной из известных и математически изученных геометрических структур, поэтому

каждая точка на карте имеет не только географические координаты (долготу и широту), но и должна быть ориентирована относительно истинного севера. Для Каспийского моря эта ориентация составила  $2,6^\circ$ . Для уточнения батиметрической модели привлекались данные промеров глубин и аэрофотоснимки [Ивкина и др., 1997; Ivkina, Stroyeva, 2007].

**Метеорологические данные.** Ветровые характеристики являются основными входными данными при моделировании уровней воды. В настоящее время данные реанализа метеорологических величин являются наиболее доступными базами данных [Лопатухин, Яицкая, 2019]. В исследовании применены данные реанализа ERA5 (hourly data on single levels) полей ветра на высоте 10 м (меридиональный и зональный) и атмосферного давления с разрешением  $0,25^\circ$  [Hersbach et al., 2018] за периоды 1980, 1990, 2000–2020, 2021 гг., так как данные находятся в свободном доступе, а также реанализ включает поля метеорологических параметров с дискретностью 1 час.

Сравнение данных наблюдательной сети с данными реанализа ERA5 показало, что за период с 1979 по 2021 г. скорость ветра имеет корреляционную связь, которая составила от 0,63 до 0,86, абсолютная ошибка (MAE) менее 2 м/с, RMSE от 1,64 до 2,12 (рис. 2).

**Начальные условия.** Данные наблюдений за уровнем моря были получены по береговым станциям РГП «Казгидромет»: МГ Форт-Шевченко, МГ Актау (табл. 1). Форт-Шевченко расположен в Баутинской бухте, Актау – на восточном берегу Каспийского моря в юго-западной части полуострова Мангышлак [Ежегодные данные..., 2021].

Основные параметры модели и схема расчета уровенной поверхности представлены на рис. 3.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Моделирование уровенной поверхности осуществлялось за 20-летний период (2000–2020) и за отдельные годы (1980, 1990, 2000, 2010, 2020, 2021). Для примера на рис. 4 представлены графики наблюдаемых и смоделированных уровней моря за 2020 г. по морским станциям Форт-Шевченко и Актау.

Калибровка модели осуществлялась за 1980, 1990, 2000, 2010, 2020, 2021 гг. посредством расчета изменения уровня моря при изменении калибровочных параметров модели. В результате определено, что оптимальное значение коэффициента турбулентной вязкости Смагоринского, учитывающего вихревое движение, равно 0,5, оптимальное значение коэффициента шероховатости Маннинга составило  $0,031 \text{ м}^{-1/3} \text{ с}$ .

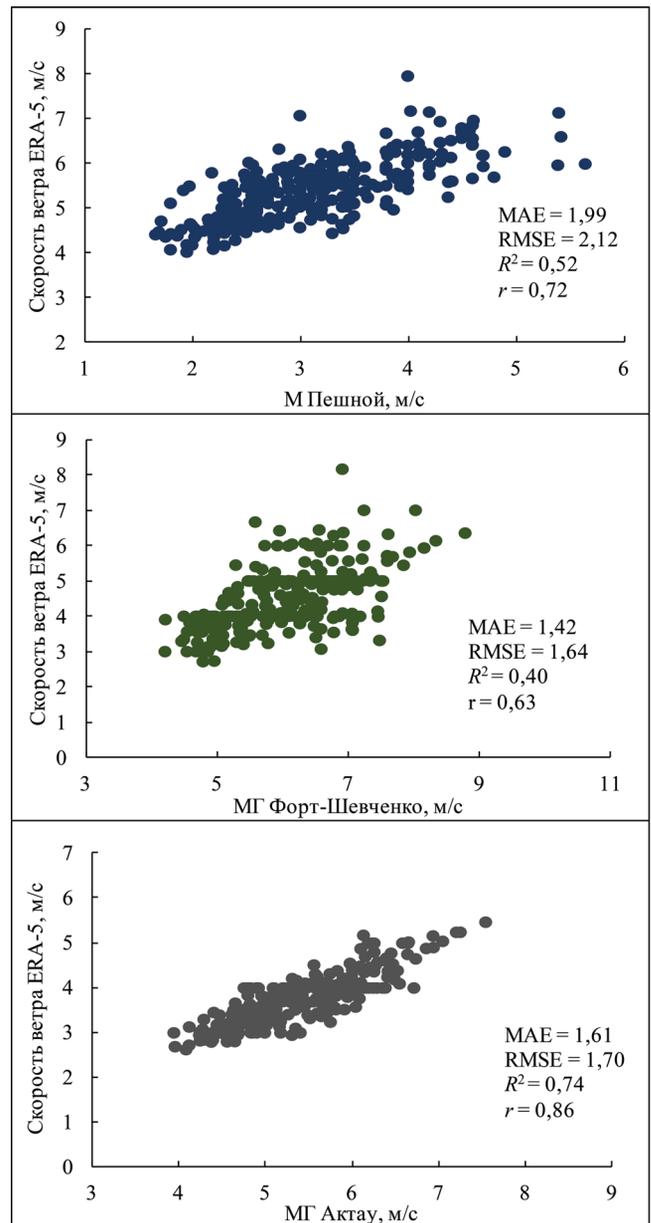


Рис. 2. Графики связи скорости ветра по данным реанализа с измеренными на морских станциях

Fig. 2. Graphs of the relationship of wind speed according to reanalysis data with measured at sea stations

Результаты моделирования достаточно хорошо согласуются с измеренными значениями уровня моря.

Верификация модели проводилась для многолетнего периода (2000–2020), за указанный период коэффициент корреляции между наблюдаемыми и смоделированными уровнями воды для Форт-Шевченко составил 0,97, для Актау – 0,95.

Качество расчетов уровня моря оценивалось с применением общепринятых статистических критериев [Попов, 1979], таких как коэффициент корреляции, среднее квадратическое отклонение, средняя квадратическая ошибка, коэффициент де-

терминации, а также коэффициент эффективности или Нэша-Сатклифа, который широко используется для оценки производительности модели при гидрологическом моделировании. Он варьирует от минус бесконечности до 1, причем большее значение указывает на лучшее соответствие [Nash, Sutcliffe, 1970]:

$$E = 1 - \frac{\sum (x_i - y_i)^2}{\sum (x_i - \bar{x})^2}. \quad (4)$$

Индекс согласия находится в пределах от 0 до 1, причем большое значение указывает на лучшее соответствие [Willmott et al., 1985]:

$$d = 1 - \frac{\sum (x_i - y_i)^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2 + \sum (x_i - \bar{x})^2}. \quad (5)$$

Сравнение смоделированных и фактических данных осуществлялось через каждые 6 часов, в сроки наблюдений на морских станциях и постах (00, 6, 12, 18 ч).

Таблица 1

### Точки прогнозов для акваторий Каспийского моря

Пункт	Период наблюдений	Широта	Долгота	Глубина, м
МГ Форт-Шевченко	1993–2022	44°32′	50°14′	–14,50
МГ Актау	1961–2022	43°36′	51°13′	–17,85

Примечание: МГ – морская гидрологическая станция.

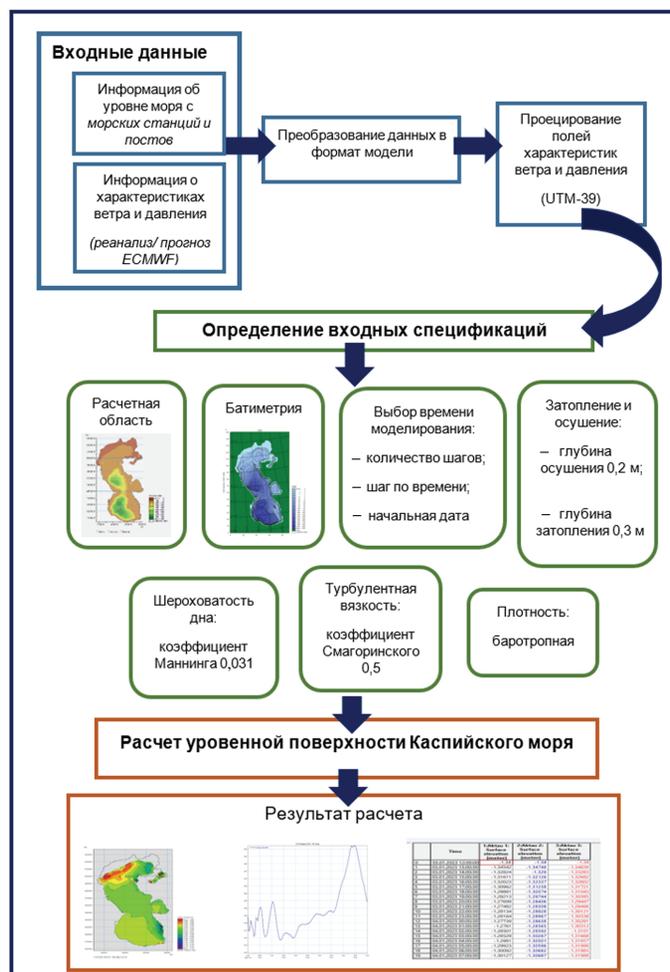


Рис. 3. Схема моделирования уровня моря с применением программного комплекса MIKE Zero

Fig. 3. Sea level modeling scheme using the MIKE Zero software package

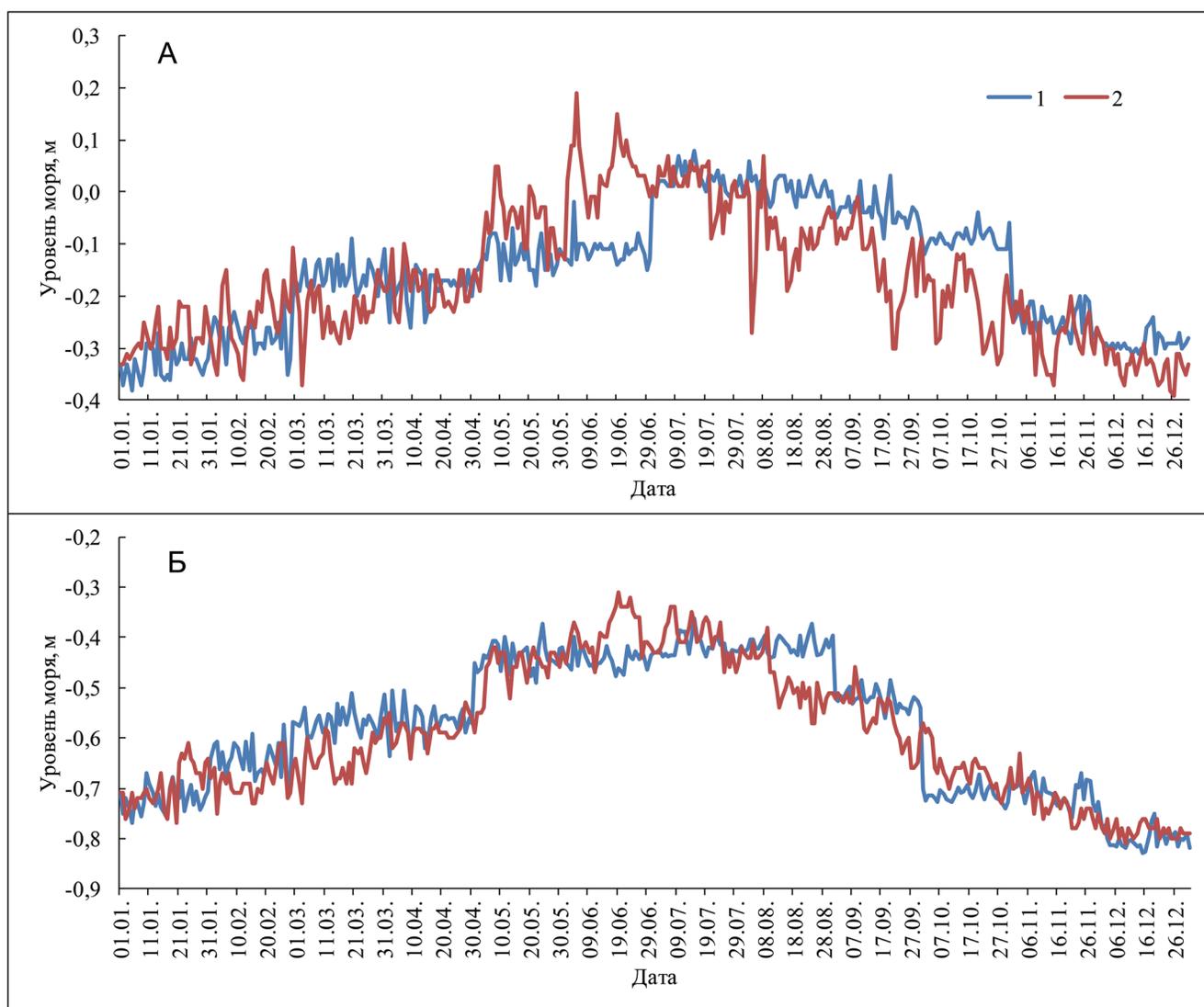


Рис. 4. График хода рассчитанного (1) и измеренного (2) уровня моря в 2020 г.: А – МГ Форт-Шевченко; Б – Актау

Fig. 4. Graph of the calculated (1) and measured (2) sea level for 2020: А – Fort Shevchenko; Б – Aktau

Как следует из таблицы 2, для Актау коэффициент корреляции, который при линейной зависимости служит как мера тесноты связи и как показатель, характеризующий степень приближения корреляционной зависимости, находился в пределах 0,66–0,95, абсолютная ошибка – 3–8 см, среднее квадратичное отклонение – в пределах 0,1–0,50, а  $S/\sigma$ , являющееся показателем точности метода, – 0,14–0,89. Значения индекса согласия довольно близки к 1, поэтому можно считать, что смоделированные значения имеют достаточно высокое согласие с наблюдаемыми данными. Для Форт-Шевченко (табл. 2) коэффициент корреляции находился в пределах 0,56–0,97, абсолютная ошибка – 5–8 см, среднее квадратичное отклонение – в диапазоне 0,07–0,41, а  $S/\sigma = 0,22–0,96$ . Значения коэффициента детерминации были от 0,31 до 0,95. Индекс согласия достаточно высок – от 0,80 до 0,99.

В целом данные критерии качества, в соответствии с Наставлением по службе морских гидрологических прогнозов [Наставление..., 2011], характеризуют надежность результатов. В дальнейшем представленная модель может использоваться для разработки методики оперативного прогноза уровня моря.

Следующим этапом была проверка работы модели на конкретном штормовом нагоне, который наблюдался на северо-восточном побережье в период шторма 5–7 марта 2022 г. на восточном побережье Северного Каспия в районе залива Мертвый Култук. Данный нагон был вызван ветром западного направления. По данным метеорологической станции Бейнеу средняя скорость ветра юго-западного направления составляла 16 м/с с порывами до 18–23 м/с. По данным морской станции Форт-Шевченко в это время преобладал ветер западной

четверти со скоростью ветра до 20 м/с, что вызвало нагонное повышение уровня в районе Форт-Шевченко на 17 см.

Учитывая, что в районе расположения месторождения «Култук» нет наблюдательных пунктов, было произведено моделирование уровня поверхности с использованием программного комплекса MIKE Zero. В качестве входных данных использовалась информация по Форт-Шевченко и

прогностические характеристики ветра и давления с ЕЦСПП [ECMWF, 2022].

Результаты моделирования показали, что в некоторых районах, примыкающих к заливу Мертвый Култук, уровень моря в период с 5 по 7 марта поднимался на 71 см, что вызвало затопление части побережья. На рис. 5 показано смоделированное положение водной поверхности до нагона и в пик нагона.

Таблица 2

### Оценка точности и эффективности расчетов уровня воды Каспийского моря

Статистические параметры	2000–2020	2021	2020	2010	2000	1990	1980
<i>Ақтау</i>							
Коэффициент корреляции	0,95	0,94	0,90	0,80	0,72	0,91	0,66
Коэффициент детерминации	0,91	0,86	0,82	0,64	0,51	0,82	0,43
Среднее квадратичное отклонение $\sigma$ , м	0,50	0,12	0,13	0,13	0,12	0,10	0,11
Средняя квадратическая ошибка $S$ , м	0,07	0,04	0,06	0,09	0,08	0,06	0,10
Средняя абсолютная ошибка $\Delta$ , м	0,05	0,03	0,05	0,07	0,07	0,05	0,08
Коэффициент эффективности	0,79	0,85	0,78	0,65	0,48	0,81	0,38
Стандартное отклонение	0,07	0,04	0,06	0,09	0,08	0,06	0,10
Индекс согласия	0,94	0,96	0,95	0,89	0,83	0,95	0,80
$S/\sigma$	0,14	0,34	0,44	0,65	0,85	0,43	0,89
$0,674\sigma$	0,34	0,08	0,09	0,09	0,08	0,09	0,08
<i>Форт-Шевченко</i>							
Коэффициент корреляции	0,97	0,81	0,67	0,87	0,56		
Коэффициент детерминации	0,95	0,66	0,44	0,75	0,31		
Среднее квадратичное отклонение $\sigma$ , м	0,41	0,13	0,13	0,13	0,07		
Средняя квадратическая ошибка $S$ , м	0,09	0,08	0,10	0,07	0,07		
Средняя абсолютная ошибка $\Delta$ , м	0,07	0,06	0,08	0,05	0,05		
Коэффициент эффективности	0,22	0,63	0,21	0,71	0,98		
Индекс согласия	0,80	0,90	0,80	0,93	0,99		
$S/\sigma$	0,22	0,63	0,78	0,50	0,96		
$0,674\sigma$	0,28	0,09	0,09	0,09	0,05		

Таким образом, при помощи данной модели мог быть спрогнозирован опасный нагон, который зафиксировали и космические снимки спутника Sentinel-3 OLCI 3 и 7 марта 2022 г. [Sentinel..., 2022].

### ВЫВОДЫ

В связи с активным освоением открытой акватории Каспийского моря для ведения работ по разработке нефтяных месторождений, развитием морских портов на казахстанской части побережья Каспийского моря вопрос оперативного расчета изменения уровня моря, его краткосрочный, а также долгосрочный прогноз на будущее является актуальной темой для исследования.

В связи с этим проведено тестирование применимости гидродинамического модуля MIKE 21 Flow Model FM программного комплекса MIKE Zero в казахстанской части Каспийского моря. В результате калибровки модели получены оптимальные значения параметров модели: коэффициент турбулентной вязкости Смагоринского равен 0,5, коэффициент шероховатости Маннинга –  $0,031 \text{ м}^{-1/3} \text{ с}$ .

Оценка точности смоделированных данных с применением статистических критериев показала, что критерии находятся в допустимых пределах и, следовательно, использование метода является целесообразным. Результаты моделирования достаточно хорошо согласуются с измеренными значениями уровня моря. В дальнейшем программный

комплекс может использоваться для разработки методики оперативного прогноза уровня моря.

Стоит отметить, что программный комплекс MIKE Zego включает ряд дополнительных инструментов для анализа и визуализации результатов, таких как *Time series comparator*, позволяющий сравнивать временные ряды по статистическим критериям (средняя ошибка, средняя абсолютная ошибка, средняя квадратическая ошибка, коэффициент детерминации, коэффициент эффективности, коэффициент корреляции и др.); *MIKE to Google*

*Earth* с возможностью создания KML-файла и отображения его в Google Earth и др.

Внедрение данной системы в оперативную практику позволит усовершенствовать существующую систему прогнозирования, своевременно предупреждать гражданское население об опасных морских наводнениях и разработать стратегию действий в случае затопления. Особенно это актуально для северо-восточного района Каспийского моря, малоохваченного данными натурных наблюдений.

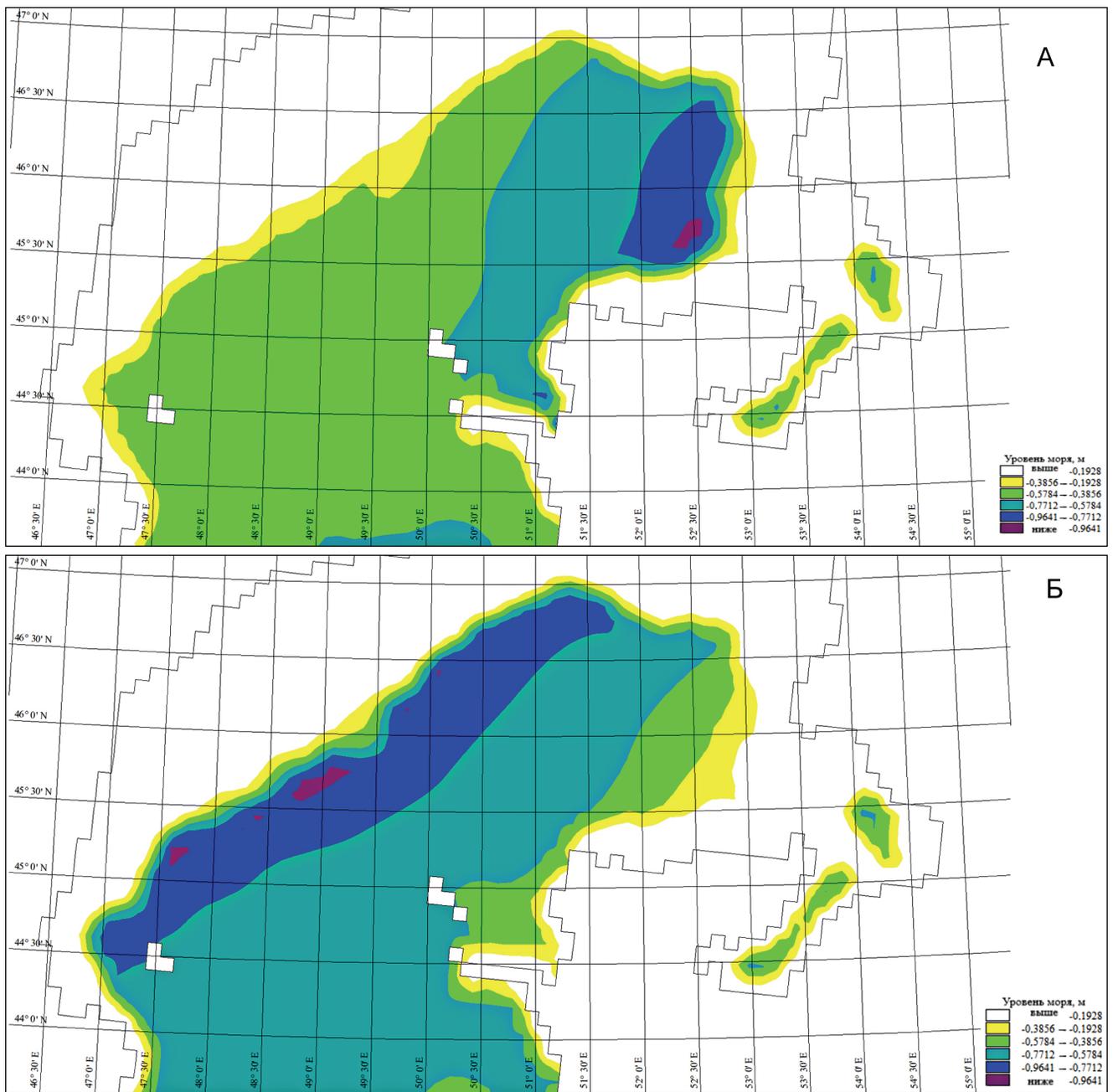


Рис. 5. Карта положения уровенной поверхности до нагона (А) и в период пика нагона (Б)

Fig. 5. Level surface position map before the surge (A) and during the peak of the surge (B)

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ахмадиев А.К., Брылов Д.С. Каспий: особенности недропользования и вопросы геополитики // Геополитика и экогеодинамика регионов. 2020. Т. 6(16). Вып. 4. С. 36–48.
- Геританский Н.Д. Исследование и расчет сгонно-нагонных колебаний уровня воды Северного Каспия: автореф. дис. ... канд. геогр. наук. Ростов н/Д. 1978. 24 с.
- Гидрометеорология и гидрохимия морей. Т. VI. Каспийское море. Вып. 1. 1992. 359 с.
- Ежегодные данные о режиме Каспийского моря (казахстанское побережье), 2020 г. Нур-Султан: Аликампор, 2021. 61 с.
- Елтай А.Г., Ивкина Н.И., Васенина Е.И., Наурызбаева Ж.К., Шишкина Г.М. Прогнозирование гидродинамических процессов с использованием модели MIKE ZERO (на примере порта Актау): материалы IV Международной научной конференции памяти чл.-кор. РАН Д.Г. Матишова «Развитие водных транспортных магистралей в условиях глобального изменения климата на территории российской федерации (Евразии). Опасные явления», Ростов-на-Дону, 5–9 сентября 2022 г. 2022. С. 88–90.
- Ивкина Н.И. Сгонно-нагонные явления в устьевой зоне казахстанского сектора Каспийского моря // Труды государственного океанографического института (ГОИН Росгидромета). 2013. Вып. 214. С. 278–290.
- Ивкина Н.И. Прогнозирование опасных сгонно-нагонных явлений для районов нефтедобычи на Каспийском море // Метеоспектр. Вопросы специализированного гидрометеорологического обеспечения. М.: АНО «Метеоагентство Росгидромета». 2007. Вып. 4. С. 191–195.
- Ивкина Н.И., Строева Т.П. Исследование и оперативное прогнозирование неперриодических колебаний уровня воды Каспийского моря в Казахстане: материалы 4-й Международной конференции ЮНЕСКО, программа 481 «Колебание уровня воды Каспийского моря». Актау. 2006. С. 59–65.
- Ивкина Н.И., Строева Т.П., Васенина Е.И. и др. К вопросу о создании батиметрической модели Каспийского моря // Гидрометеорология и экология. 1997. № 2. С. 103–109.
- Йенсен Х.Р., Ивкина Н.И., Строева Т.П. Некоторые результаты тестирования системы предупреждения штормовых нагонов на Каспийском море // Гидрометеорология и экология, 2002, Вып. 1. С. 93–100.
- Лопатухин Л.И., Яицкая Н.А. Данные реанализа полей ветра над Каспийским морем для расчета режима ветрового волнения // Водные ресурсы. 2019. Т. 46. № 6. С. 598–604.
- Любицкий Ю.В., Кравчук Л.П., Забродина О.И. и др. Результаты испытаний метода краткосрочного (с заблаговременностью 72 часа) прогноза изменений уровня моря на побережье Охотского моря, северной части Японского моря, восточном побережье полуострова Камчатка // Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. 2020. № 47. С. 60–78.
- Нестеров Е.С. Водный баланс и колебания уровня Каспийского моря. Моделирование и прогноз. М.: Трида ЛТД, 2016. 378 с.
- Попов Е.Г. Гидрологические прогнозы. М.: Гидрометеоздат, 1979. 256 с.
- Филиппов Ю.Г. Численное исследование колебаний уровня и течений северной части Каспийского моря при различных значениях его фонового уровня // Водные ресурсы. 1997. Т. 24. Вып. 4. С. 424–429.
- Gurumoorthi K., Venkatachalapathy R. Hydrodynamic modeling along the southern tip of India: A special emphasis on Kanyakumari coast, *Journal of Ocean Engineering and Science*, 2017, p. 1–16.
- Hanapiah M., Saad S., Ahmad Z. Hydrodynamic Modelling In Inshore Reef Area Within Kuantan Coastal Region, *Journal Clean WAS*, 2020, vol. 4(1), p. 01–07.
- Hermans T.H.J. Understanding Sea-Level Change Using Global and Regional Models, 2022, DOI: 10.4233/uuid:ad44006f-b50d-49b9-bf64-ee5cb7a55980.
- Hersbach H., Bell B., Berrisford P. et al. ERA5 hourly data on single levels from 1959 to present. DOI: 10.24381/cds.adbb2d47. (CDS), 2018, DOI: 10.24381/cds.adbb2d47.
- Ivkina N.I., Stroyeva T.P. Automated Method of the Storm Surges Fore-casting for the Kazakhstan's part of the Caspian Sea, *Proceeding of JCOMM Scientific and Technical Symposium on Storm Surges*, 2–6 October 2007, Seoul, Korea, p. 34.
- Kulp S.A., Strauss B.H. New elevation data triple estimates of global vulnerability to sea-level rise and coastal flooding, *Nat Commun.*, 2019, vol. 10, 4844, DOI: 10.1038/s41467-019-12808-z.
- Luan N., Tung T. A study on hydrodynamics and morphodynamics of the Nha Trang bay, Khanh Hoa province, *Proceeding of the 19<sup>th</sup> IAHR-APD Congress*, 2014, Hanoi, Vietnam, 7 p.
- MIKE 21 Flow Model and MIKE 21 Flood Screening Tool, Hydrodynamic Module, Scientific documentation, DHI, 2019.
- MIKE 21 Flow Model Hydrodynamic Module, User Guide, DHI, 2017.
- Nash J.E., Sutcliffe J. River flow forecasting through conceptual models, pt I, A discussions of principles, *Journal of Hydrology*, 1970, vol. 10, p. 282–290.
- Nguyen P., Gourbesville P., Audra P. et al. Methodology for Wastewater Discharge Modeling – Application to Danang Bay, Vietnam, *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 2020, 505 012047.
- Smagorinsky J., Manabe S., Holloway J.E. Numerical Results from a Nine-level General Circulation Model of the Atmosphere, *Monthly Weather Review*, 1965, vol. 93, p. 727–768.
- Symonds A.M., Vijverberg T., Post S. et al. Comparison between MIKE 21 FM, DELFT3D and DELFT3D FM flow models of western port bay, Australia, *Coastal Engineering Proceedings*, 2017, vol. 1(35), currents. 11, DOI: 10.9753/icce.v35.currents.11.
- Willmott C.J., Ackleson S.G., Davis R.E. et al. Statistics for the evaluation and comparison of models, *Journal of Geophysical Research*, 1985, vol. 90, p. 8995–9005.
- Электронные ресурсы  
Наставление по службе прогнозов. 2011. URL: <https://method.meteorf.ru/norma/document/nast2011.pdf> (дата обращения 05.04.2022).

Порт Актау. URL: [www.portaktau.kz/ru](http://www.portaktau.kz/ru) (дата обращения 31.01.2022).  
 Порт Курык. URL: [portkuryk.kz/ru/port](http://portkuryk.kz/ru/port) (дата обращения 02.02.2022).  
 DHI. URL: [www.dhigroup.com](http://www.dhigroup.com) (дата обращения 02.02.2022).  
 ECMWF, URL: [www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/set-iii](http://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/set-iii) (дата обращения 05.04.2022).  
 Sentinel Hub EO Browser, URL: [apps.sentinel-hub.com/eo-browser](https://apps.sentinel-hub.com/eo-browser) (дата обращения 10.04.2022).

Поступила в редакцию 19.11.2022

После доработки 10.04.2023

Принята к публикации 04.12.2023

## SEA LEVEL MODELING IN THE KAZAKHSTAN PART OF THE CASPIAN SEA USING THE MIKE 21 MODEL

A.G. Yeltay<sup>1</sup>, N.I. Ivkina<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>RSE “Kazhydromet”, Research Center, Department of Hydrometeorological Research of the Caspian Sea

<sup>1</sup>Al-Farabi Kazakh National University, Faculty of Geography and Environmental Management, Department of Meteorology and Hydrology

<sup>1</sup>Leading Scientific Researcher, doctoral student; e-mail: [eltai\\_a@meteo.kz](mailto:eltai_a@meteo.kz)

<sup>2</sup>Head of the Department, Ph.D. in Geography; e-mail: [n\\_ivkina@mail.ru](mailto:n_ivkina@mail.ru)

The article presents the results of adaptation of the MIKE21 Flow Model FM hydrodynamic module of the MIKE Zero software package to the Caspian Sea region using reanalysis data of wind and pressure fields, both for individual years and for a long-term period (2000–2020). The quality of modeling results was assessed using the statistical methods. The correlation coefficient between observed and simulated water levels for the period of 2000–2020 was 0,97 for Fort Shevchenko and 0,95 for Aktau. Model calibration allowed obtaining optimal values of model parameters, such as the Smagorinsky turbulent viscosity coefficient of 0,5 and the Manning roughness coefficient of 0,031. The evaluation for the multi-year period and the individual cases demonstrated that the modeling quality criteria were within acceptable limits. The results of the model verification based on the data for 2000–2020 and its testing for the storm surge on March 5–7, 2022, indicated that in the future the MIKE Zero software package could be used for operational sea level forecasting.

**Keywords:** hydrodynamics, MIKE21 Flow Model FM hydrodynamic model

### REFERENCES

- Akhmadiev A.K., Brylov D.S. Kaspий: osobennosti nedropol'zovaniya i voprosy geopolitiki [The Caspian Sea: aspects of subsoil use and geopolitical issues], *Geopolitika i ekogeodinamika regionov*, 2020, vol. 6(16), no. 4, p. 36–48. (In Russian)
- Ezhegodnye dannye o rezhime Kaspiiskogo morya (kazakhstanskoe poberezh'e), 2020 g. [Early data on the regime of the Caspian Sea (the Kazakhstan coast)], Nur-Sultan, Alikamkor Publ., 2021, 61 p. (In Russian)
- Gidrometeorologiya i gidrokimiya morei, t. VI, Kaspiiskoe more [Hydrometeorology and hydrochemistry of seas, vol. VI, The Caspian Sea], vyp. 1, 1992, 359 p. (In Russian)
- Gurumoorathi K., Venkatachalapathy R. Hydrodynamic modeling along the southern tip of India: A special emphasis on Kanyakumari coast, *Journal of Ocean Engineering and Science*, 2017, p. 1–16.
- Hanapiah M., Saad S., Ahmad Z. Hydrodynamic Modelling In Inshore Reef Area Within Kuantan Coastal Region, *Journal Clean WAS*, 2020, 4(1), 01–07.
- Hermans T.H.J. *Understanding Sea-Level Change Using Global and Regional Models*, DOI: 10.4233/uuid:ad44006f-b50d-49b9-bf64-ee5cb7a55980, 2022.
- Hersbach H., Bell B., Berrisford P. et al. ERA5 hourly data on single levels from 1959 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S), *Climate Data Store (CDS)*, 2018, DOI: 10.24381/cds.adbb2d47.
- Ivkina N.I. Sgonno-nagonnye yavleniya v ust'evoi zone kazakhstanskogo sektora Kaspiiskogo morya [Surges in the river mouth zone of the Kazakhstan sector of the Caspian Sea], *Trudy gosudarstvennogo okeanograficheskogo instituta (GOIN Rosgidrometa)*, 2013, no. 214, p. 278–290. (In Russian)
- Ivkina N.I., Stroeveva T.P., Vasenina E.I., Nesterkina G.I. K voprosu o sozdanii batimetricheskoi modeli Kaspiiskogo morya [On the construction of a digital bathymetric model of the Caspian Sea], *Gidrometeorologiya i ekologiya*, 1997, no. 2, p. 103–109. (In Russian)
- Ivkina N.I., Stroyeva T.P. Automated Method of the Storm Surges Fore-casting for the Kazakhstan's part of the Caspian Sea, *Proceeding of JCOMM Scientific and Technical Symposium on Storm Surges*, 2–6 October 2007, Seoul, Korea, p. 34.
- Kudryaeva K.I., Seryakov E.I., Skriptunova L.I. *Morskije gidrologicheskie prognozy* [Marine hydrological forecasts], Gidrometeoizdat Publ., 1974, 312 p. (In Russian)

- Kulp S.A., Strauss B.H. New elevation data triple estimates of global vulnerability to sea-level rise and coastal flooding, *Nat Commun.*, 2019, 10, 4844, DOI: 10.1038/s41467-019-12808-z.
- Lopatukhin L.I., Yaitskaya N.A. Data of Wind Field Reanalysis over the Caspian Sea for Calculating the Regime of Wind Waves, *Water Resources*, 2019, vol. 46, no. 6, p. 926–933.
- Luan N., Tung T. A study on hydrodynamics and morphodynamics of the Nha Trang bay, Khanh Hoa province, *Proceeding of the 19th IAHR-APD Congress 2014*, Hanoi, Vietnam, 7 p.
- Lyubitskii Yu.V., Kravchuk L.P., Zabrodina O.I. et al. Rezul'taty ispytaniy metoda kratkosrochnogo (s zablagovremennost'yu 72 chasa) prognoza izmeneniy urovnya morya na poberezh'e Okhotskogo morya, severnoi chasti Yaponskogo morya, vostochnom poberezh'e poluostrova Kamchatka [Results of testing a method of short-term (72 hours ahead) forecast of the sea level variation for the coast of the Sea of Okhotsk, northern part of the Sea of Japan and the eastern coast of the Kamchatka Peninsula], *Rezultaty ispytaniya novykh i usovershenstvovannykh tekhnologii, modelei i metodov gidrometeorologicheskikh prognozov*, 2020, no. 47, p. 60–78. (In Russian)
- MIKE 21 Flow Model and MIKE 21 Flood Screening Tool, Hydrodynamic Module, Scientific documentation, DHI, 2019.
- MIKE21 Flow Model Hydrodynamic Module, User Guide, DHI, 2017.
- Nash J.E., Sutcliffe J. River flow forecasting through conceptual models, pt I, A discussions of principles, *Journal of Hydrology*, 1970, 10, p. 282–290.
- Nesterev E.S. *Vodnyi balans i kolebaniya urovnya Kaspiiskogo morya. Modelirovanie i prognoz* [Water balance and sea level oscillation of the Caspian Sea. Modeling and forecast], Moscow, Triada ltd Publ., 2016, 378 p. (In Russian)
- Nguyen P., Gourbesville P., Audra P. et al. Methodology for Wastewater Discharge Modeling – Application to Danang Bay, Vietnam, *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 2020, 505 012047.
- Popov E.G. *Gidrologicheskie prognozy* [Hydrological forecasts], Gidrometeoizdat, 1979, 256 p. (In Russian)
- Smagorinsky J., Manabe S., Holloway J.E. Numerical Results from a Nine-level General Circulation Model of the Atmosphere, *Monthly Weather Review*, 1965, vol. 93, p. 727–768.
- Symonds A.M., Vijverberg T., Post S. et al. Comparison between MIKE 21 FM, DELFT3D and DELFT3D FM flow models of western port bay, Australia, *Coastal Engineering Proceedings*, 2017, 1(35), currents. 11, DOI: 10.9753/icce.v35.currents.11.
- Willmott C.J., Ackleson S.G., Davis R.E. et al. Statistics for the evaluation and comparison of models, *Journal of Geophysical Research*, 1985, 90, 8995–9005.
- Web sources*
- Nastavlenie po sluzhbe prognozov*, 2011, URL: <https://method.meteor.ru/norma/document/nast2011.pdf> (access date 05.04.2022). (In Russian)
- Port Aktau, URL: [www.portaktau.kz/ru](http://www.portaktau.kz/ru) (access date 31.01.2022). (In Russian)
- Port Kuryk, URL: [portkuryk.kz/ru](http://portkuryk.kz/ru) (access date 02.02.2022). (In Russian)
- DHI, URL: [www.dhigroup.com](http://www.dhigroup.com) (access date 02.02.2022).
- ECMWF, URL: [www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/set-iii](http://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/set-iii) (access date 05.04.2022).
- Sentinel Hub EO Browser, URL: [apps.sentinel-hub.com/eo-browser](https://apps.sentinel-hub.com/eo-browser) (access date 10.04.2022).

Received 19.11.2022

Revised 10.04.2023

Accepted 04.12.2023