

Особенности гидродинамических процессов в районе Бакальской косы по данным численного моделирования

В. В. Фомин, Д. И. Лазоренко*

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

*e-mail: d.lazorenko.dntmm@gmail.com

Поступила 25.06.2020 г.; принята к публикации 10.08.2020 г.; опубликована 25.09.2020 г.

Гидродинамические процессы оказывают определяющее влияние на морфодинамику береговой зоны морей. В настоящей работе на основе численного моделирования исследуются характеристики течений, уровня моря и ветрового волнения в районе Бакальской косы при разных типах штормовых ситуаций. Для численного моделирования использовалась совместная модель *ADCIRC+SWAN*, которая включает баротропную гидростатическую модель течений *ADCIRC* и спектральную волновую модель *SWAN*. Совместная модель реализована на неструктурированной сетке с высоким пространственным разрешением. Расчеты для штормовой ситуации в Черном море 20–27 марта 2013 г. показали, что поле течений в районе Бакальской косы испытывает сильную пространственно-временную изменчивость. Наибольшие скорости течений (до 0.9 м/с) возникают между островом и оконечностью косы. Нагоны в районе косы достигают 0.3 м. В ходе уровня моря преобладают колебания с периодом ~ 10.5 ч. Этот период близок к периоду низшей моды сейшевых колебаний Каркинитского залива. Ветровое волнение наиболее интенсивно с западной стороны косы, и в период максимального развития шторма высота значительных волн h_s достигает 2–2.5 м. Восточная часть косы менее подвержена воздействию волнения. Здесь значения h_s в два раза меньше. Между оконечностью косы и островом максимумы h_s составляют 1 м. Сопоставление расчетов волнения по полной модели *ADCIRC+SWAN* и по модели *SWAN* показало, что полная модель дает бóльшие высоты волн. С западной стороны косы это увеличение h_s достигает 0.5 м.

Ключевые слова: Черное море, Крым, Бакальская коса, течения, ветровое волнение, уровень моря, математическое моделирование, *ADCIRC+SWAN*.

Благодарности: исследование выполнялось в рамках темы Морского гидрофизического института РАН № 0827-2018-0004 при финансовой поддержке РФФИ (проект № 18-05-80035).

Для цитирования: Фомин В. В., Лазоренко Д. И. Особенности гидродинамических процессов в районе Бакальской косы по данным численного моделирования // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2020. № 3. С. 31–47. doi:10.22449/2413-5577-2020-3-31-47

© Фомин В. В., Лазоренко Д. И., 2020



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0)

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0) License

Hydrodynamic Process Peculiarities in the Bakalskaya Spit Area as per Computational Modeling Data

V. V. Fomin, D. I. Lazorenko*

Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia
*e-mail: d.lazorenko.dntmm@gmail.com

Submitted 25.06.2020; revised 10.08.2020; published 25.09.2020

Hydrodynamic processes have a decisive influence on morphodynamics of the coastal area of seas. This paper studies, using computational modeling, characteristics of currents, sea level and wind waves in the Bakalskaya Spit area at storm situations of various types. For computational modeling the joined model ADCIRC+SWAN was used, which includes the barotropic hydrostatic model of currents ADCIRC and spectral wave model SWAN. The joined model uses an unstructured grid with a high spatial resolution. Calculations for a storm situation in the Black Sea (20–27 March, 2013) showed that the current field in the Bakalskaya Spit area varies greatly in terms of time and space. The greatest current velocities (up to 0.9 m/s) emerge between the island and the spit tip. Surges in the spit area reach up to 0.3 m. In the variation of sea level, oscillations with a period of ~ 10.5 h prevail. This period is close to that of the lowest mode of seiche oscillations in the Karkinitzky Bay. The wind waves are the most intensive at the western side of the spit, and during the storm peak, the height of significant waves h_s reaches 2–2.5 m. The eastern side of the spit is less exposed to the waves. Here, the h_s values are half as big. Between the spit tip and the island the maxima h_s are 1 m. Matching calculations of waves performed using the joined model ADCIRC+SWAN and using the model SWAN showed that the joined model provides higher waves. At the western side of the spit, this increase in h_s reaches 0.5 m.

Keywords: Black Sea, Crimea, Bakalskaya Spit, currents, wind waves, sea level, mathematical modeling, ADCIRC+SWAN.

Acknowledgements: the research is performed under topic no. 0827-2018-0004 of the Marine Hydrophysical Institute RAS and funded by the RFBR (Project no. 18-05-80035).

For citation: Fomin, V.V. and Lazorenko, D.I., 2020. Hydrodynamic Process Peculiarities in the Bakalskaya Spit Area as per Computational Modeling Data. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (3), pp. 31–47. doi:10.22449/2413-5577-2020-3-31-47 (in Russian).

Введение

Бакальская коса представляет собой уникальный природный объект в Каркинитском заливе Черного моря, имеющий статус ландшафтно-рекреационного парка регионального значения (рис. 1). В последнее десятилетие произошли значительные изменения структуры косы, обусловленные как природными, так и антропогенными факторами. В 2010 г. вследствие интенсивных штормов, вызванных западными ветрами, произошел сильный размыв самого узкого участка косы и формирование острова [1]. В условиях дефицита донного материала процесс размыва косы принял необратимый характер. В настоящее время ширина пролива между островом и косой



Рис. 1. Конфигурация Бакальской косы после образования острова (белые линии – изобаты (м); белые кружки с буквами – точки, в которых выводились результаты численного моделирования)

Fig. 1. The Bakalskaya Spit configuration after the island formation. White lines are isobates (m); white circles with letters are points for withdrawing the results of computational modeling

увеличивается, а сам остров постепенно смещается в восточном направлении в сторону свала глубин. Можно предположить, что по мере дальнейшего смещения острова к востоку донные наносы начнут уходить на подводный склон. Представляется, что без восстановления устойчивой подпитки косы наносами (а предпосылок к этому нет) через некоторое время остров исчезнет.

Существует ряд публикаций, посвященных различным аспектам изменчивости Бакальской косы. Так, в работах [1–5] на основе данных контактных и спутниковых измерений проанализированы основные тенденции в измерении формы надводной части косы. Детальные цифровые модели батиметрии в районе косы получены в [6–8]. Математическое моделирование деформаций косы для различных штормовых условий выполнено в [9, 10]. В работе [11] на основе данных реанализа изучена изменчивость параметров ветрового волнения в районе Бакальской косы на отрезке времени 1979–2017 гг. и оценены внутригодовые вариации скорости течений с помощью математического моделирования.

В работе [11] также представлены результаты натурального эксперимента по исследованию пространственной структуры течений в районе Бакальской косы, выполненного 15–16 июня 2018 г. В период проведения эксперимента преобладающий поток был направлен из Каркинитского залива в открытое море, наиболее сильные течения (до 0.5 м/с) наблюдались между северной оконечностью косы и островом, течение огибало остров с севера и юга и далее соединялось в единый поток.

В целом можно констатировать, что характеристики гидродинамических процессов в районе Бакальской косы изучены недостаточно. Поэтому

целью настоящей работы является исследование характеристик течений, ветрового волнения и уровня моря в районе Бакальской косы при разных типах ветровых воздействий на основе численного моделирования с высоким пространственным разрешением с учетом механизмов взаимодействия между волнением и течениями.

Математическая модель

Для численного моделирования гидродинамических процессов в районе Бакальской косы использовалась совместная конечно-элементная модель *ADCIRC+SWAN* [12], включающая баротропную гидростатическую модель течений *ADCIRC* (*Advanced Circulation Model for Shelves Coasts and Estuaries*) [13] и спектральную волновую модель *SWAN* (*Simulation Waves Nearshore*) [14].

При заданном рельефе дна и известных атмосферных воздействиях совместная модель позволяет проводить одновременные расчеты полей течений, уровня моря и ветрового волнения на неструктурированной треугольной сетке. Совместная модель дает возможность учитывать механизмы взаимодействия между течениями, уровнем моря и ветровыми волнами. Подробное описание характеристик *ADCIRC+SWAN* и выбор входных параметров приведены в работах [15–17], посвященных исследованиям штормовых нагонов и ветрового волнения в различных районах Азово-Черноморского бассейна. Валидация модели проводилась в [15].

Искомые характеристиками модели *ADCIRC+SWAN* являются: u , v – осредненные по глубине компоненты скорости течения по координатам x и y ; η – уровень моря; h_s – высота значительных волн. Величины u , v представляют собой компоненты ветро-волнового течения, вызванного касательными напряжениями ветра и волновыми напряжениями, обусловленными диссипацией волновой энергии в зоне трансформации и обрушения ветровых волн.

Параллельные коды *ADCIRC+SWAN* были реализованы на вычислительном кластере МГИ (URL: hpc-mhi.org). Применялся баротропный вариант модели *ADCIRC* с осреднением по глубине. Механизм осушки и затопления не использовался. Шаги интегрирования по времени в моделях *SWAN* и *ADCIRC* составляли 600 и 1 с соответственно. В модели *ADCIRC* коэффициент донного трения C_d определялся с помощью постоянного параметра шероховатости Маннинга $n = 0.02 \text{ м}^{-1/3}$. Коэффициент горизонтальной турбулентной вязкости $A_h = 10 \text{ м}^2/\text{с}$. В модели *SWAN* учитывались следующие физические механизмы: генерация волн приземным ветром, обрушение волн на глубокой воде (англ. *whitcapping*), четырехволновое нелинейное взаимодействие, рефракция на неоднородностях рельефа дна, донное трение и обрушение волн на критических глубинах. Разрешение *SWAN* по угловой координате равнялось 10° . По частотной координате применялась неравномерная сетка с 40 узлами в диапазоне частот от 0.03 до 1.4 Гц.

Использовалась неструктурированная расчетная сетка для всего Азово-Черноморского бассейна со сгущением в районе Бакальской косы (всего ~ 226 000 конечных элементов). Очевидно, что применение такой сетки

требует значительно бóльших объемов вычислений по сравнению с альтернативным подходом, когда рассматривается расчетная область небольших размеров с жидкими боковыми границами. Однако при таком подходе возникает необходимость в задании на жидких границах корректных краевых условий, что является сложной проблемой.

Результаты численного моделирования и их обсуждение

Перейдем к рассмотрению результатов численного моделирования динамических процессов в районе Бакальской косы.

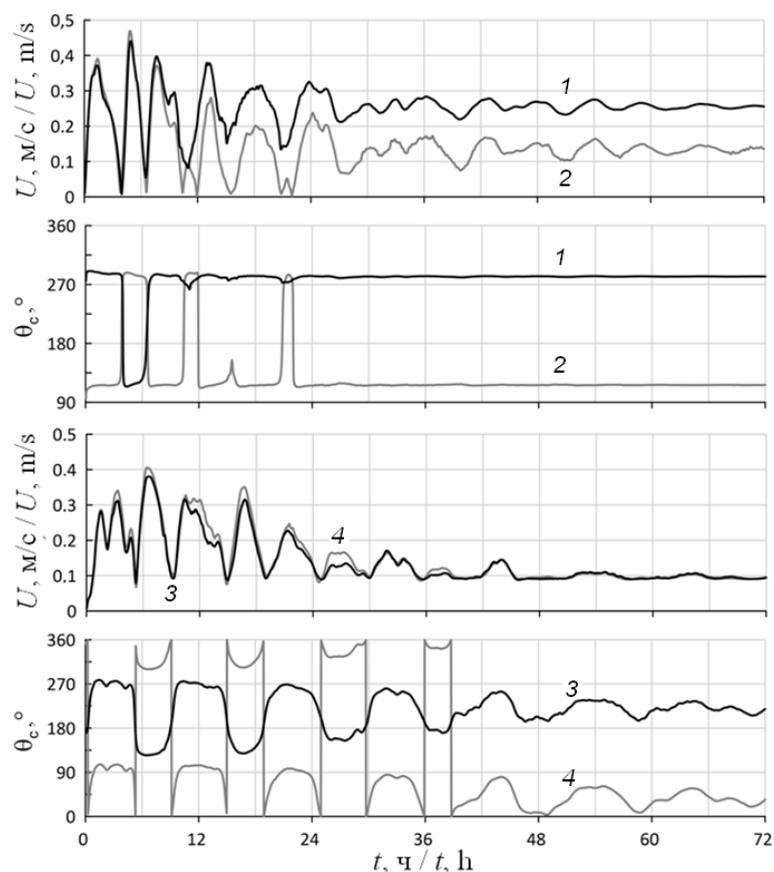
1. Постоянный ветер разных направлений. В первом цикле численных экспериментов рассматривалась ситуация, когда на поверхность Черного моря воздействует однородный по пространству ветер заданного направления θ . В начальный момент времени $t = 0$ скорость течений, возвышения уровня моря и высоты ветровых волн имеют нулевые значения. При $t > 0$ скорость ветра W линейно увеличивается и при $t = t_m$ достигает своего максимального значения $W_m = 10$ м/с, оставаясь далее неизменной. Общее время ветрового воздействия – 72 ч (слабый продолжительный шторм).

Течения. Представляет интерес выяснить, как при таком поле ветра происходит формирование течений в районе Бакальской косы. Для этого анализировались изменения во времени скорости и направления течений в характерных точках акватории. Положение и буквенные обозначения этих точек показаны на рис. 1.

На рис. 2 приведены зависимости от времени скорости $U = [u^2 + v^2]^{1/2}$ и направления θ_c течения в точке D (пролив между косой и островом) для западного, восточного, южного и северного направлений ветра при $t_m = 6$ ч. Анализ этих зависимостей показывает, что под воздействием ветра в проливе формируется течение, скорость которого имеет колебательный характер. Самые большие значения U (0.40 – 0.45 м/с) возникают на стадии увеличения скорости ветра. После того как W перестает меняться, скорость течения постепенно уменьшается, приближаясь к некоторому предельному значению, зависящему от направления ветра. На стадии линейного увеличения скорости ветра направление течения θ_c начинает испытывать реверсивные колебания (рис. 2). Причем продолжительность этих колебаний связана с направлением ветра. При меридиональных ветрах колебания θ_c более продолжительные по сравнению с колебаниями течения при зональных ветрах. Анализ результатов расчетов показал, что в других точках исследуемой акватории характер зависимости θ_c от направления ветра аналогичен.

Уровень моря. В колебаниях уровня моря в районе Бакальской косы прослеживается похожая закономерность – при меридиональных ветрах колебания уровня более интенсивные, чем при зональных (рис. 3). Для каждого направления ветра максимальные изменения уровня моря η происходят на стадии увеличения скорости ветра. Возможный механизм такой зависимости интенсивности колебаний уровня от направления ветра обсуждается ниже.

Волнение. При фиксированной скорости ветра интенсивность волнения в районе Бакальской косы определяется величинами эффективных разгонов

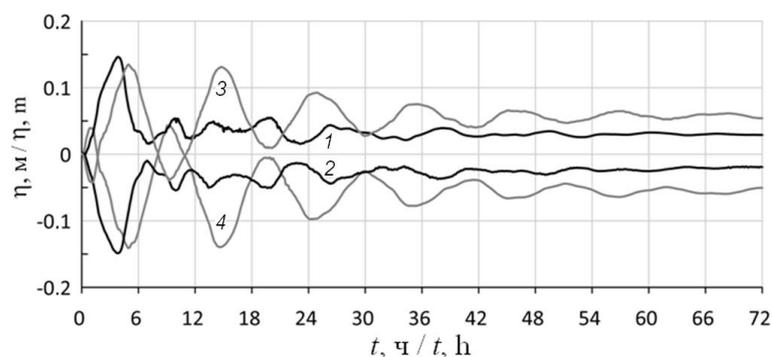


Р и с . 2. Изменения во времени скорости U и направления θ_c течений в точке D при $W_m = 10$ м/с и $t_m = 6$ ч: кривая 1 – западный ветер ($\theta = 270^\circ$); 2 – восточный ветер ($\theta = 90^\circ$); 3 – южный ветер ($\theta = 180^\circ$); 4 – северный ветер ($\theta = 0^\circ$)

Fig. 2. Temporal variations of velocity U and directions of currents θ_c at D point at $W_m = 10$ m/s and $t_m = 6$ h. Curves numeration: 1 – west wind ($\theta = 270^\circ$); 2 – east wind ($\theta = 90^\circ$); 3 – south wind ($\theta = 180^\circ$); 4 – north wind ($\theta = 0^\circ$)

и локальными значениями глубины H . Максимальные высоты значительных волн h_s (м) в характерных точках вокруг косы для $W_m = 10$ м/с приведены в табл. 1. Обозначения З, В, Ю и С в заголовках колонок соответствуют западному, восточному, южному и северному ветрам. Как видно из таблицы, западная сторона косы подвержена более интенсивному волнению по сравнению с восточной. Максимальные значения h_s между оконечностью косы и островом (точка D) достигают 0.86 м. С западной стороны острова h_s достигает 1.2 м.

2. Реальная синоптическая ситуация. Далее исследовались гидродинамические условия в районе Бакальской косы в случае реальной синоптической ситуации, возникшей в Черном море 20–27 марта 2013 г. В этот период произошел сильный шторм. Он достиг своего максимального развития



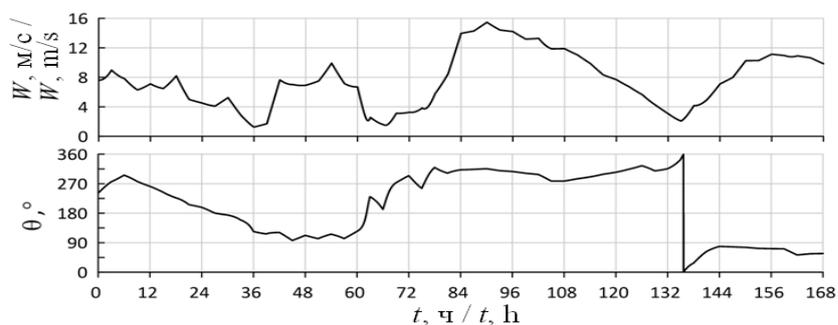
Р и с . 3 . Колебания уровня моря η в точке D при $W_m = 10$ м/с и $t_m = 6$ ч: кривая 1 – западный ветер ($\theta = 270^\circ$); 2 – восточный ветер ($\theta = 90^\circ$); 3 – южный ветер ($\theta = 180^\circ$); 4 – северный ветер ($\theta = 0^\circ$)

F i g . 3 . Sea level oscillations η at D point at $W_m = 10$ m/s and $t_m = 6$ h. Curves numeration: 1 – west wind ($\theta = 270^\circ$); 2 – east wind ($\theta = 90^\circ$); 3 – south wind ($\theta = 180^\circ$); 4 – north wind ($\theta = 0^\circ$)

Т а б л и ц а 1 . Максимумы высоты значительных волн h_s (м) в районе Бакальской косы для западного, восточного, южного и северного ветров при $W_m = 10$ м/с

T a b l e 1 . Maxima of significant wave height h_s (m) at the Bakalskaya Spit area for west, east, south and north winds at $W_m = 10$ m/s

Точка / Point	H , м / H, m	h_s			
		З / W	В / E	Ю / S	С / N
A	10.2	1.43	0.82	0.92	1.02
B	7.8	1.34	0.64	0.81	0.96
C	6.2	1.29	0.57	0.76	0.88
D	2.5	0.86	0.68	0.63	0.68
E	7.2	0.70	0.82	0.57	0.80
F	8.9	0.67	0.82	0.56	0.93
G	7.3	1.32	0.44	0.76	0.92
H	5.2	1.28	0.27	0.70	0.78
I	6.2	0.28	0.77	0.33	0.69
J	8.5	0.43	0.78	0.42	0.88
K	7.7	0.53	0.75	0.44	0.94
L	8.7	1.03	0.73	0.70	0.89
M	6.5	1.02	0.85	0.68	0.93
N	5.1	1.20	0.87	0.85	0.94
O	8.1	0.68	0.84	0.56	0.95



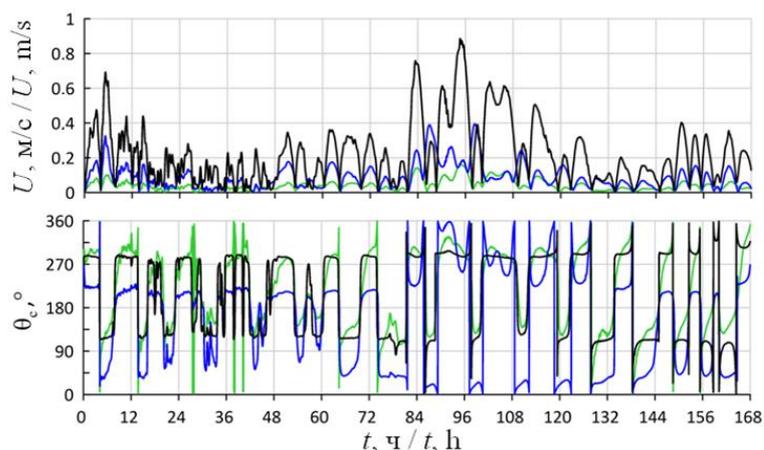
Р и с . 4 . Скорость W и направление θ ветра в точке D для синоптической ситуации 20–27 марта 2013 г. по данным модели WRF

Fig. 4. Velocity W and direction θ of the wind at D point for the meteorological situation of 20–27 March 2013 as per WRF model data

23–24 марта 2013 г., когда почти вся акватория моря находилась под влиянием периферии глубокого малоподвижного циклона.

Были выполнены расчеты полей течений, волнения и уровня моря в районе Бакальской косы для периода 20–27 марта 2013 г. Вынуждающими силами являлись поля скорости ветра и атмосферного давления из модели WRF (URL: ecobase.org.ua) с дискретностью 3 ч и пространственным разрешением 0.05° .

Графики скорости и направления ветра из модели WRF для точки D приведены на рис. 4. Как видно, в интервале времени от 72 до 84 ч произошло резкое увеличение скорости северо-западного ветра, который не менял своего генерального направления на протяжении 48 ч, что привело к возникновению продолжительного шторма в районе Бакальской косы.



Р и с . 5 . Скорость и направление течения в точках D (черные кривые), C (голубые кривые) и E (зеленые кривые) для синоптической ситуации 20–27 марта 2013 г.

Fig. 5. Velocity and direction of the current at D (black curves), C (blue curves) and E (green) points for the meteorological situation of 20–27 March 2013

Течения. На рис. 5 даны зависимости от времени скорости и направления течения в точках *D*, *C* и *E* для рассматриваемой синоптической ситуации. Отсюда следует, что течения в районе косы испытывают сильные квазипериодические колебания как по величине, так и по направлению. Наибольшие скорости течения (до 0.9 м/с) возникают в проливе (в точке *D*). В двух других точках скорость течения не превышает 0.4 м/с.

Уровень моря. Как показали расчеты уровня моря у Бакальской косы, за период шторма максимальный нагон достиг 0.3 м (при $t = 85$ ч), а максимальный сгон составил 0.2 м (при $t = 152$ ч). В ходе уровня моря прослеживаются колебания с хорошо выраженной периодичностью (сплошная кривая на рис. 6). Было выявлено, что эти колебания усиливаются по мере приближения к вершине Каркинитского залива. Об этом свидетельствует ход уровня моря в точке, расположенной на 28 км восточнее Бакальской косы (штриховая кривая на рис. 6). Это усиление колебаний может быть связано с возбуждением сейш.

На рис. 7 показаны периодограммы колебаний уровня моря для синоптической ситуации 20–27 марта 2013 г. у Бакальской косы и в вершине Каркинитского залива. Как видно в обоих случаях, подавляющая часть энергии колебаний приходится на период $T = 10.5$ ч. Можно предположить, что это проявление сейшевых колебаний. Для оценки периодов сейшевых колебаний в заливе применялась формула Мериана для бассейна с открытым входом [18]: $T = 4a/(1 + 2k)/(gh)^{1/2}$, где a , h – длина и средняя глубина залива; g – ускорение силы тяжести; k – номер моды. При $a = 100$ км, $h = 12$ м для низшей моды ($k = 0$) рассчитанный по этой формуле период составляет 10.2 ч, что хорошо согласуется с полученным значением T . Из вышеизложенного следует предположение, что сейшевые колебания могут вносить заметный вклад в изменчивость уровня моря в исследуемом районе.

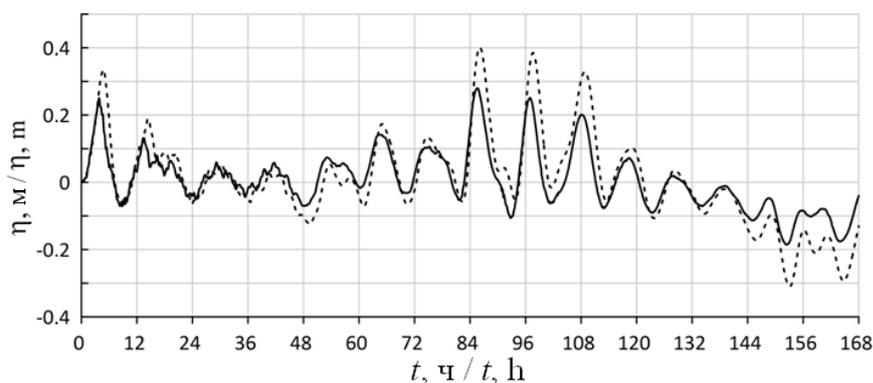


Рис. 6. Колебания уровня моря для синоптической ситуации 20–27 марта 2013 г.: в точке *D* (сплошная кривая); в точке в вершине Каркинитского залива (45.9483° с. ш., 33.4821° в. д.) (штриховая кривая)

Fig. 6. Sea level oscillations for the meteorological situation 20–27 March 2013: *D* point (solid curve); the point at the Karkinit-sky Bay apex (45.9483° N, 33.4821° E) (dashed curve)

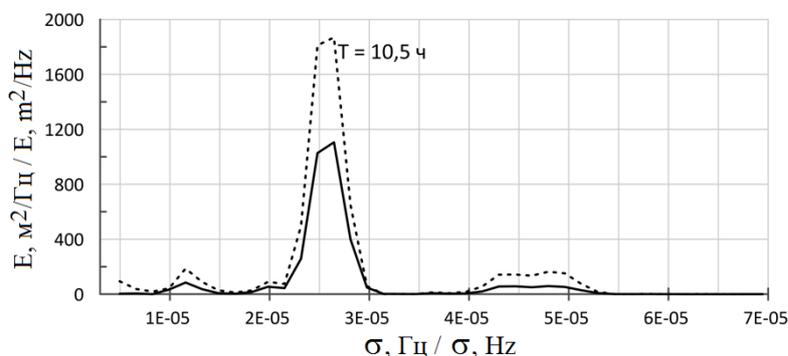


Рис. 7. Периодограмма колебаний уровня моря для синоптической ситуации 20–27 марта 2013 г. Сплошная кривая соответствует точке D у Бакальской косы; штриховая кривая – точке, расположенной в вершине Каркинитского залива

Fig. 7. Periodogram of sea level oscillations for the meteorological situation 20–27 March 2013. The solid curve corresponds to D point at the Bakalskaya Spit; the dashed curve corresponds to the point at the Karkinitsky Bay apex

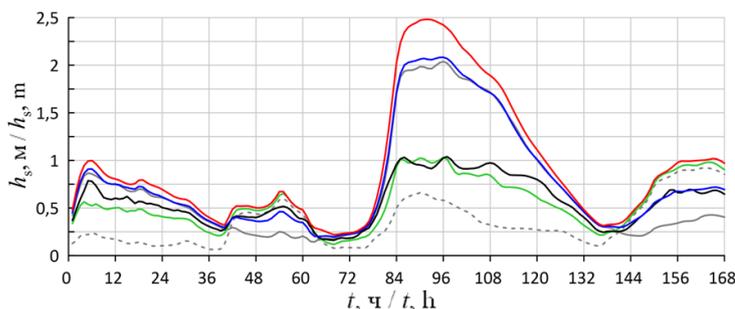


Рис. 8. Высота значительных волн для синоптической ситуации 20–27 марта 2013 г. в точках: A (красная кривая); C (голубая кривая); D (черная кривая); E (зеленая кривая); H (серая сплошная кривая); I (серая штриховая кривая)

Fig. 8. The significant wave height for the meteorological situation 20–27 March 2013 at A (red curve), C (blue curve), D (black curve), E (green curve), H (gray curve), I (grey dashed curve) points

Волнение. Зависимости от времени высоты значительных волн h_s в шести точках акватории Бакальской косы даны на рис. 8 (значения максимумов h_s для всех точек см. в табл. 2). Анализ кривых показывает, что самое сильное ветровое волнение формируется с западной стороны косы. В период максимального развития шторма высоты волн здесь достигают 2–2.5 м (точки A, C и H). Восточная часть косы менее подвержена воздействию волнения. Из сопоставления данных в точках H и I следует, что высоты волн с восточной стороны косы меньше в 2.2 раза. В проливе между оконечностью косы и островом (точка D) максимальные высоты волн составляют ~ 1 м, что обусловлено относительно малыми глубинами в промоине.

Т а б л и ц а 2. Максимумы высоты значительных волн h_s в районе Бакальской косы для синоптической ситуации 20–27 марта 2013 г.

Table 2. Maxima of significant wave height h_s at the Bakalskaya Spit area for the meteorological situation 20–27 March 2013

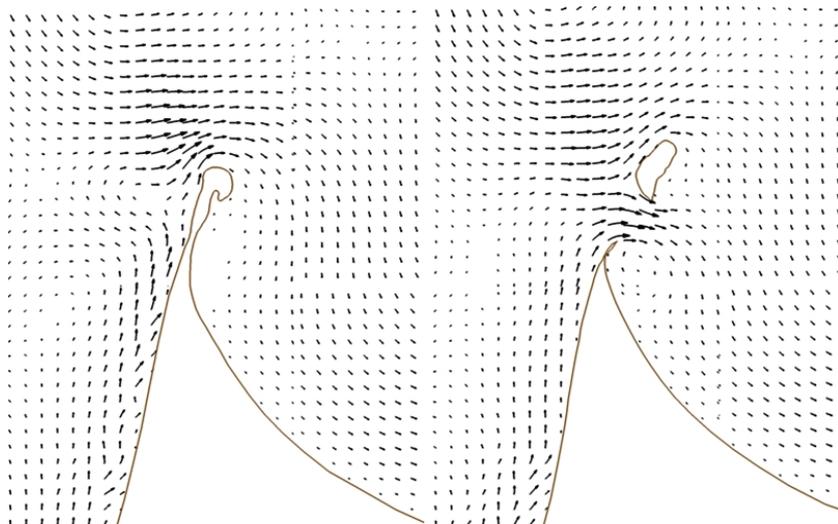
Точка / Point	$\max(h_s)$, м / $\max(h_s)$, m	$\max(h_{s0})$, м / $\max(h_{s0})$, m	Δ_a , м / Δ_a , m	Δ_r , %
A	2.48	2.11	0.37	15
B	2.22	1.76	0.46	21
C	2.08	1.58	0.50	24
D	1.04	0.82	0.22	21
E	1.03	0.9	0.13	13
F	1.20	1.05	0.15	13
G	2.22	1.73	0.49	22
H	2.04	1.54	0.50	25
I	0.92	0.84	0.08	9
J	0.99	0.90	0.09	9
K	1.19	1.07	0.12	10
L	1.33	1.09	0.24	18
M	1.38	1.16	0.22	16
N	1.70	1.35	0.35	21
O	1.22	1.11	0.11	9

Учет механизмов взаимодействия. Описанные выше модельные расчеты проведены по совместной модели, которая учитывает влияние течений U и уровня моря η на характеристики ветрового волнения. Переменные U и η входят в коэффициенты модели SWAN. Был проведен дополнительный численный эксперимент, в котором не учитывалось влияние U и η на волнение (табл. 2). Видно, что учет влияния течений и уровня моря в модели SWAN приводит к повсеместному увеличению высот волн. В среднем это увеличение составляет 0.27 м. Справа от косы (точки B, C, G и H) оно достигает 0.5 м. В процентном выражении увеличение высоты волн в точке H достигает 25 %.

Сопоставление скорости течений и уровня моря в районе косы, рассчитанных по модели ADCIRC без учета влияния волнения (волновых напряжений), с результатами совместной модели показало, что учет влияния волн приводит к увеличению скорости течений. Наиболее отчетливо это увеличение проявляется в период максимального шторма (84–120 ч). Средне-квадратическая разность между экспериментами составляет 0.12 м/с.

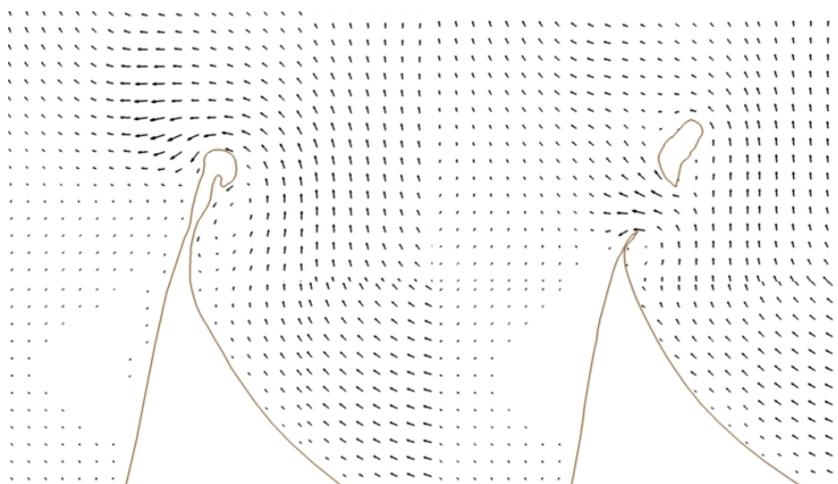
3. Пространственная структура течений при ветре разных направлений. В заключительной серии численных экспериментов анализировалась пространственная структура течений в районе Бакальской косы до и после ее размыва. Для этого была построена еще одна расчетная сетка, учитывающая конфигурацию косы до размыва. Моделирование выполнялось

для однородного по пространству ветра разных направлений (запад, юго-запад, юг, юго-восток, восток, северо-восток, север, северо-запад) при $W_m = 15$ м/с и $t_m = 6$ ч. Общее время интегрирования составляло 72 ч. Некоторые примеры полей течений при $t = 72$ ч представлены на рис. 9 и 10. Анализ результатов моделирования показал следующее.



Р и с . 9 . Схемы средних по глубине течений в районе Бакальской косы при западном ветре до и после размыва ($t = 72$ ч)

Fig. 9. Schemes of depth-mean currents at the Bakalskaya Spit area during a west wind before and after erosion ($t = 72$ h)



Р и с . 10 . Схемы средних по глубине течений в районе Бакальской косы при восточном ветре до и после размыва ($t = 72$ ч)

Fig. 10. Schemes of depth-mean currents at the Bakalskaya Spit area during an east wind before and after erosion ($t = 72$ h)

Западный берег косы. При ветрах западного, юго-западного, южного и юго-восточного направлений течения вдоль западного побережья косы направлены на север. Когда ветер имеет западное направление, у западной стороны оголовка косы формируется хорошо выраженный меандр. При восточном ветре вдольбереговое течение существенно ослабевает. При ветрах северо-восточного, северного и северо-западного направлений происходит смена направления вдольберегового течения с северного на южное. После формирования острова коса укоротилась, но структура течений у западного берега в целом осталась прежней.

Восточный берег косы. При всех рассмотренных направлениях ветра течения у восточного берега косы более слабые по сравнению с течениями вдоль западного берега. Наиболее слабая циркуляция вод соответствует ветрам западных румбов. При восточном и северо-восточном направлениях ветра южнее оголовка косы возникает локальный циклонический круговорот. Наличие круговорота указывает на то, что до размыва косы при указанных ветрах здесь могла возникать застойная зона, способствующая осадконакоплению.

Район промоины. Направление и интенсивность течений в промоине определяется генеральным направлением ветра. При западных, юго-западных и северо-западных ветрах преобладающий поток направлен в Каркинитский залив, а при восточных и северо-восточных – в сторону открытого моря. Самые сильные течения в промоине возникают, когда ветер имеет западное, юго-западное и северо-западное направления.

Результаты моделирования показывают (рис. 9), что при западном ветре в промоине возникают сильные течения, направленные на восток. В остальной картина течений в районе косы остается качественно неизменной. При восточном ветре (рис. 10) в промоине формируются сильные течения в западном направлении. При этом скорость течений с северной стороны образовавшегося острова заметно ниже, чем скорость течений с северной стороны оголовка косы.

Заключение

Анализ результатов численного моделирования гидродинамических процессов в районе Бакальской косы позволил выявить следующие особенности.

Для однородного по пространству ветра разных направлений показано, что на стадии увеличения скорости ветра течения в районе косы испытывают квазипериодические колебания по скорости и направлению. При меридиональных ветрах эти колебания более продолжительные по сравнению с зональными ветрами. В изменениях уровня моря у косы прослеживается та же закономерность – при меридиональных ветрах колебания уровня моря более продолжительные, чем при зональных.

Расчеты для штормовой ситуации в Черном море 20–27 марта 2013 г. показали, что поле течений в районе косы испытывает сильную пространственно-временную изменчивость. Наибольшие скорости течений (до 0.9 м/с) возникают в проливе. В ходе уровня моря преобладают колебания с периодом $T = 10.5$ ч. Этот период близок к периоду низшей моды сейсмических колебаний Каркинитского залива. Нагоны в районе косы достигают 0.3 м, а сгоны – 0.2 м.

Ветровое волнение наиболее интенсивно с западной стороны косы. В период максимального развития шторма значения h_s достигают 2–2.5 м. Восточная часть косы менее подвержена воздействию волнения. Здесь высоты волн в 2.2 раза меньше. Между оконечностью косы и островом максимум h_s составляет 1 м. Сопоставление расчетов волнения по полной модели *ADCIRC+SWAN* и по модели *SWAN* показало, что рассчитанные по полной модели высоты волн больше. Увеличение h_s в среднем равно 0.27 м, а справа от косы оно достигает 0.5 м.

Анализ схем течений, формируемых в районе Бакальской косы постоянными ветрами разных направлений, показал следующее. Течения у западного берега косы направлены на север при ветрах западного, юго-западного, южного и юго-восточного направлений и на юг – при северо-восточном, северном и северо-западном ветрах. Течения вдоль восточного берега более слабые по сравнению с течениями с западной стороны косы, и для них характерно наличие вихревых структур. Самые сильные течения между островом и оконечностью косы возникают при западном, юго-западном и северо-западном ветрах. При ветрах западных румбов эти течения направлены в Каркинитский залив, а при ветрах восточных румбов – в сторону открытого моря. После формирования острова течения у восточного берега косы незначительно усилились.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горячкин Ю. Н., Косьян Р. Д. Бакальская коса – уникальный природный объект Крымского полуострова (обзор) // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2018. № 4. С. 5–14. doi:10.22449/2413-5577-2018-4-5-14
2. Современное состояние и эволюция Бакальской косы / В. А. Иванов [и др.] // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2012. Вып. 26, т. 1. С. 8–15.
3. Горячкин Ю. Н., Харитонова Л. В. Динамика береговой линии в районе Бакальской косы // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2018. № 4. С. 22–30. doi:10.22449/2413-5577-2018-4-22-30
4. Крыленко В. В., Крыленко М. В. Высокоточная съемка рельефа Бакальской косы // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2018. № 4. С. 65–72. doi:10.22449/2413-5577-2018-4-65-72
5. Руднев В. И. Особенности рельефа дна прибрежной зоны Бакальской косы // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2018. № 4. С. 15–21. doi:10.22449/2413-5577-2018-4-15-21
6. Крыленко В. В., Крыленко М. В., Алейников А. А. Исследование подводного рельефа Бакальской банки по данным космических снимков SENTINEL-2 // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2019. № 2. С. 30–39. doi:10.22449/2413-5577-2019-2-30-39
7. Руднев В. И., Дивинский Б. В., Косьян Р. Д. Изменения топографии прибрежной зоны Бакальской косы с 2018 по 2019 годы // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2020. № 1. С. 22–35. doi:10.22449/2413-5577-2020-1-22-35

8. *Горячкин Ю. Н., Гуров К. И.* Механический состав пляжевых наносов Бакальской косы // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2017. № 3. С. 48–56.
9. *Фомин В. В., Алексеев Д. В., Харитонова Л. В.* Моделирование морфодинамики Бакальской косы // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2013. Вып. 27. С. 374–380.
10. *Харитонова Л. В., Иванча Е. В., Алексеев Д. В.* Влияние штормовых нагонов и ветровых волн на морфодинамические процессы в районе Бакальской косы // Морской гидрофизический журнал. 2015. № 1. С. 79–90. doi:10.22449/0233-7584-2015-1-79-90
11. *Дивинский Б. В.* Гидродинамические условия вод в районе Бакальской косы // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2018. № 4. С. 31–39. doi:10.22449/2413-5577-2018-4-31-39
12. Modeling hurricane waves and storm surge using integrally-coupled, scalable computations / J. C. Dietrich [et al.] // Coastal Engineering. 2011. Vol. 58, iss. 1. P. 45–65. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2010.08.001>
13. *Luetlich R. A., Westerink J. J.* Formulation and numerical implementation of the 2D/3D ADCIRC finite element model version 44.XX. 2004. URL: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.675.3043&rep=rep1&type=pdf> (дата обращения: 08.09.2020).
14. *Zijlema M.* Computation of wind-wave spectra in coastal waters with SWAN on unstructured grids // Coastal Engineering. 2010. Vol. 57, iss. 3. P. 267–277. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2009.10.011>
15. *Фомин В. В., Полозок А. А.* Технология моделирования штормовых нагонов и ветрового волнения в Азовском море на неструктурированных сетках // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2013. Вып. 27. С. 139–145.
16. *Fomin V. V., Lazorenko D. I., Fomina I. N.* Numerical modeling of water exchange through the Kerch Strait for various types of the atmospheric impact // Physical Oceanography. 2017. № 4. P. 79–89. doi:10.22449/1573-160X-2017-4-79-89
17. Simulation and Analysis of Sea Floods in the Don River Delta / V.V. Fomin [et al.] // Russian Meteorology and Hydrology. 2018. Vol. 43, iss. 2. P. 95–102. <https://doi.org/10.3103/S106837391802005X>
18. *Rabinovich A. B.* Seiches and harbor oscillations // Handbook of Coastal and Ocean Engineering / Ed. Y. C. Kim. Singapoure : World Scientific Publ., 2009. Chapter 9. P. 193–236. https://doi.org/10.1142/9789812819307_0009

Об авторах:

Фомин Владимир Владимирович, заведующий отделом вычислительных технологий и математического моделирования, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), доктор физико-математических наук, **ORCID ID: 0000-0002-9070-4460**, fomin.dntmm@gmail.com

Лазоренко Дмитрий Иванович, научный сотрудник отдела вычислительных технологий и математического моделирования, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат технических наук, **ORCID ID: 0000-0001-7524-565X**, d.lazorenko.dntmm@gmail.com

Заявленный вклад авторов:

Фомин Владимир Владимирович – постановка задачи, анализ результатов численного моделирования и подготовка статьи

Лазоренко Дмитрий Иванович – подготовка расчетных сеток, проведение численных экспериментов и участие в анализе результатов моделирования

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Goryachkin, Yu.N. and Kosyan, R.D., 2018. The Bakalskaya Spit is a Unique Natural Object of the Crimean Peninsula (Review). *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (4), pp. 5–14. doi:10.22449/2413-5577-2018-4-5-14 (in Russian).
2. Ivanov, V.A., Goryachkin, Yu.N., Udovik, V.F., Kharitonova, L.V. and Schutov, S.A., 2012. [The Modern State and Evolution of the Bakalskaya Spit]. In: MHI, 2012. *Ekologicheskaya Bezopasnost' Pribrezhnykh i Shel'fovykh Zon i Kompleksnoe Ispol'zovanie Resursov Shel'fa* [Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones and Comprehensive Use of Shelf Resources]. Sevastopol: ECOSI-Gidrofizika. Iss. 26, vol. 1, pp. 25–30 (in Russian).
3. Goryachkin, Yu.N. and Kharitonova L.V., 2018. Dynamics of the Shoreline in the Area of the Bakalskaya Spit. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (4), pp. 22–30. doi:10.22449/2413-5577-2018-4-22-30 (in Russian).
4. Krylenko, V.V. and Krylenko, M.V., 2018. Experience of High-Accuracy Survey of the Bakalskaya Spit Relief. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (4), pp. 65–72. doi:10.22449/2413-5577-2018-4-65-72 (in Russian).
5. Rudnev, V.I., 2018. Peculiarities of the Bottom Relief of the Bakalskaya Spit Foreshore. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (4), pp. 15–21. doi:10.22449/2413-5577-2018-4-15-21 (in Russian).
6. Krylenko, V.V., Krylenko, M.V. and Aleinikov, A.A., 2019. Research of the Bakalskaya Bank Underwater Relief by Sentinel-2 Satellite Images. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (2), pp. 30–39. doi:10.22449/2413-5577-2019-2-30-39 (in Russian).
7. Rudnev, V.I., Divinskiy, B.V. and Kosyan R.D., 2020. Changes in Topography of the Coastal Zone of the Bakalskaya Spit from 2018 to 2019. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (1), pp. 22–35. doi:10.22449/2413-5577-2020-1-22-35 (in Russian).
8. Goryachkin, Yu.N. and Gurov, K.I., 2017. Mechanical Composition of Bakal Spit Beach Sediments. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (3), pp. 48–56 (in Russian).
9. Fomin, V.V., Alekseev, D.V. and Kharitonova, L.V., 2013. [Modeling of the Bakalskaya Spit Morphodynamics]. In: MHI, 2013. *Ekologicheskaya Bezopasnost' Pribrezhnykh i Shel'fovykh Zon i Kompleksnoe Ispol'zovanie Resursov Shel'fa* [Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones and Comprehensive Use of Shelf Resources]. Sevastopol: ECOSI-Gidrofizika. Iss. 27, pp. 374–380 (in Russian).
10. Kharitonova, L.V., Ivancha, E.V. and Alekseev, D.V., 2015. Effect of Storm Surges and Wind Waves on Morphodynamic Processes in the Bakalskaya Spit Region. *Physical Oceanography*, (1), pp. 73–84. doi:10.22449/1573-160X-2015-1-73-84

11. Divinsky, B.V., 2018. Hydrodynamic Water Conditions in the Bakalskaya Spit Area. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (4), pp. 31–39. doi:10.22449/2413-5577-2018-4-31-39 (in Russian).
12. Dietrich, J.C., Zijlema, M., Westerink, J.J., Holthuijsen, L.H., Dawson, C., Luetich, R.A., Jensen, R.E., Smith, J.M., Stelling, G.S. and Stone, G.W., 2011. Modeling Hurricane Waves and Storm Surge Using Integrally-Coupled, Scalable Computations. *Coastal Engineering*, 58(1), pp. 45–65. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2010.08.001>
13. Luetich, R.A. and Westerink, J.J., 2004. *Formulation and Numerical Implementation of the 2D/3D ADCIRC Finite Element Model Version 44.XX*. Available at: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.675.3043&rep=rep1&type=pdf> [Accessed: 08.09.2020].
14. Zijlema, M., 2010. Computation of Wind-Wave Spectra in Coastal Waters with SWAN on Unstructured Grids. *Coastal Engineering*, 57(3), pp. 267–277. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2009.10.011>
15. Fomin, V.V. and Polozok, A.A., 2013. [Modeling for Storm Surges and Wind Waves in the Sea of Azov Using Unstructured Grids]. In: MHI, 2013. *Ekologicheskaya Bezopasnost' Pribrezhnykh i Shel'fovykh Zon i Kompleksnoe Ispol'zovanie Resursov Shel'fa* [Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones and Comprehensive Use of Shelf Resources]. Sevastopol: ECOSI-Gidrofizika. Iss. 27, pp. 139–145 (in Russian).
16. Fomin, V.V., Lazorenko, D.I. and Fomina, I.N., 2017. Numerical Modeling of Water Exchange through the Kerch Strait for Various Types of the Atmospheric Impact. *Physical Oceanography*, (4), pp. 79–89. doi:10.22449/1573-160X-2017-4-79-89
17. Fomin, V.V., Alekseev, D.V., Lemeshko, E.M. and Lazorenko, D.I., 2018. Simulation and Analysis of Sea Floods in the Don River Delta. *Russian Meteorology and Hydrology*, 43(2), pp. 95–102. <https://doi.org/10.3103/S106837391802005X>
18. Rabinovich, A.B., 2009. Seiches and Harbor Oscillations. In: Y.C. Kim, Ed., 2009. *Handbook of Coastal and Ocean Engineering*. Singapoure: World Scientific Publ. Chapter 9, pp. 193–236. https://doi.org/10.1142/9789812819307_0009

About the authors:

Vladimir V. Fomin, Head of Department of Computational Technologies and Mathematical Modeling, Marine Hydrophysical Institute of RAS (2 Kapitanskaya St., Sevastopol, 299011, Russian Federation), Dr.Sci. (Phys.-Math.), **ORCID ID: 0000-0002-9070-4460**, fomin.dntmm@gmail.com

Dmitry I. Lazorenko, Research Associate of Department of Computational Technologies and Mathematical Modeling, Marine Hydrophysical Institute of RAS (2 Kapitanskaya St., Sevastopol, 299011, Russian Federation), Ph.D. (Phys.-Math.), **ORCID ID: 0000-0001-7524-565X**, d.lazorenko.dntmm@gmail.com

Contribution of the authors:

Vladimir V. Fomin – task setting, analysis of the computational modeling results and manuscript preparation

Dmitry I. Lazorenko – preparation of computational grids, performance of numerical experiments and participation in the modeling results analysis

All the authors have read and approved the final manuscript.