УДК: 551.461 DOI: 10.35595/2414-9179-2021-3-27-59-73

# А.А. Полозок<sup>1</sup>, В.В. Фомин<sup>2</sup>, И.Н. Фомина<sup>3</sup>

# ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СГОННО-НАГОННЫХ КОЛЕБАНИЙ В ЗАЛИВЕ ДОНУЗЛАВ (ЧЕРНОЕ МОРЕ)

## **КИЦАТОННА**

Сгонно-нагонные колебания в прибрежной зоне морей могут оказывать существенное влияние на инфраструктуру и безопасность судоходства в бухтах и заливах. Цель настоящей работы — исследование сгонно-нагонных колебаний в заливе Донузлав, расположенном на западном побережье Крымского полуострова и соединенном с морем узким проливом. Для этого используется гидродинамическая модель Advanced Circulation Model for Shelves Coasts and Estuaries (ADCIRC).

Численный алгоритм модели основан на методе конечных элементов, использующем треугольные элементы и линейные базисные функции. Входными данными модели ADCIRC служили поля скорости приземного ветра и атмосферного давления над Черным морем. Численное моделирование выполнялось на двух вложенных неструктурированных сетках. Первая сетка включала все Черное море, вторая сетка включала залив и прилегающую к нему акваторию моря.

графического отображения результатов моделирования применялся картографический пакет Generic Mapping Tools (GMT). результатов Анализ моделирования для разных направлений ветра показал, что при воздействии ветра на акваторию залива Донузлав в полях уровня моря и течений возникают сейшеобразные колебания.

Интенсивность этих колебаний определяется тем, насколько быстро скорость ветра достигает своего максимального значения. Из-за узости пролива за пределами залива колебания не проявляются. Выполнено моделирование экстремальной штормовой ситуации, возникшей в Черном море 11 ноября 2007 г.

В период шторма произошла быстрая смена направления ветра с юго-восточного на западное с одновременным усилением скорости ветра до  $15-21\,$  м/с. Это вызвало подъем уровня моря в вершине залива до  $0,5\,$  м и усиление скорости течения в проливе до  $0,6\,$  м/с.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** Черное море, Донузлав, сгонно-нагонные колебания, моделирование, ADCIRC, GMT.

\_

Морской гидрофизический институт РАН, ул. Капитанская, д. 2, 299011, Россия, Севастополь, *e-mail:* polozok.umi@gmail.com

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Морской гидрофизический институт РАН, ул. Капитанская, д. 2, 299011, Россия, Севастополь, *e-mail:* **v.fomin@mhi-ras.ru** 

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Государственный океанографический институт имени Н.Н.Зубова, Кропоткинский пер., д. 6, 119034, Россия, Москва, *e-mail:* **irina.fomina@ukr.net** 

# Anton A. Polozok<sup>1</sup>, Vladimir V. Fomin<sup>2</sup>, Irina N. Fomina<sup>3</sup>

# NUMERICAL MODELING OF SURGE OSCILLATIONS IN THE DONUZLAV BAY (BLACK SEA)

#### **ABSTRACT**

Surge oscillations in the coastal zone of the seas can have a significant impact on the infrastructure and safety of navigation in bays and bays. The purpose of this work is to study the surge oscillations in the Donuzlav Bay located on the western coast of the Crimean Peninsula and connected to the sea by a narrow strait. The Advanced Circulation Model for Shelves Coasts and Estuaries (ADCIRC) is used for this. The numerical algorithm of the model is based on the finite element method using triangular elements and linear basis functions. The input data of the ADCIRC model were the surface wind velocity and atmospheric pressure fields over the Black Sea. Numerical modeling was performed on two nested unstructured grids. The first grid included the entire Black Sea, the second grid included the bay and the adjacent sea area. To graphically display the simulation results, the Generic Mapping Tools (GMT) mapping package was used. Analysis of the simulation results for different wind directions showed that when the wind acts on the water area of the Donuzlav Bay, seiche-like oscillations occur in the fields of sea level and currents. The intensity of these fluctuations is determined by how quickly the wind speed reaches its maximum value. Owing to the narrowness of the strait outside the bay, fluctuations do not appear. Modeling of an extreme storm situation that occurred in the Black Sea on November 11, 2007 was carried out. During the storm, a rapid change in wind direction from southeast to west occurred with a simultaneous increase in wind speed to 15-21 m/s. This caused a rise in sea level at the top of the bay to 0.5 m and an increase in the current velocity in the strait to 0.6 m/s.

**KEYWORDS:** Black Sea, Donuzlav, surge fluctuations, modeling, ADCIRC, GMT.

## **ВВЕДЕНИЕ**

В Черном море сгонно-нагонные колебания имеют широкое распространение и разнообразный характер. Наиболее интенсивные сгонно-нагонные поднятия и понижения уровня у побережья Черного моря возникают под воздействием атмосферных воздействий синоптического масштаба. Подробный обзор особенностей сгонно-нагонных колебаний в Черном море, их параметры и библиографию по данному вопросу можно найти в [Фомичева и др., 1991; Иванов и др., 1999; Горячкин и др., 2006]. Также существует ряд работ по исследованию сейшевых колебаний в бухтах и заливах Черного моря [Горячкин и др., 2002; Медведев и др., 2015; Вагукіпа et al., 2016; Фомин и др., 2017; Мапіlyик et al., 2020].

Marine Hydrophysical Institute of RAS, Kapitanskaya Str., 2, 299011, Russian Federation, Sevastopol, *e-mail:* polozok.umi@gmail.com

Marine Hydrophysical Institute of RAS, Kapitanskaya Str., 2, 299011, Russian Federation, Sevastopol, *e-mail:* v.fomin@mhi-ras.ru

N.N.Zubov's State Oceanographic Institute, Kropotkinsky per, 6, 110034, Russian Federation, Moscow, *e-mail:* irina.fomina@ukr.net

Наименее изученным с точки зрения сгонно-нагонных колебаний является залив Донузлав. Залив расположен на западном побережье Крымского полуострова и представляет собой вытянутый и сужающийся в северо-восточном направлении бассейн, соединенный с морем узким каналом (рис. 1). Акватория залива является важным рекреационным объектом и естественной гаванью для малотоннажных судов различного назначения. В южной части проводится промышленная добыча песка. Значительная часть акватории занята мелководьем с глубинами 0,5–3 м. Вдоль оси залива имеется узкий канал с глубинами 10–20 м. В целом, средняя глубина залива составляет 4–5 м.



Рис. 1. Расположение залива Донузлав. Треугольниками показаны точки, в которых анализировались результаты численного моделирования

Fig. 1. Location of the Donuzlav Bay. The triangles show the points at which the results of numerical modeling were analyzed

До настоящего времени известно несколько публикаций, дающих представление о динамике вод в заливе Донузлав [Андросович и др., 1996; Ломакин и др., 2021; Немировский и др., 2000; Фомин и др., 2006]. Тем не менее, предметных исследований, посвященных сгонно-нагонным колебаниям в указанном районе, до настоящего времени не проводилось.

Настоящая работа восполняет этот пробел и ставит своей целью на основе численного моделирования исследовать пространственно-временную структуру сгонно-нагонных колебаний в заливе для разных типов ветровых условий.

# МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Расчеты течений и уровня моря в заливе Донузлав и прилегающей акватории проводились с использованием длинноволновой гидродинамической модели 2DDI ADCIRC [Luettich et al., 1992]. Исходные уравнения модели в декартовой системе координат имеют вид:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} - fV = -g \frac{\partial}{\partial x} \left[ \eta + \frac{P_{a}}{g \rho_{0}} \right] + \frac{\tau_{sx} - \tau_{bx}}{\rho_{0} H} + \frac{M_{x}}{H}, \tag{1}$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + fU = -g \frac{\partial}{\partial y} \left[ \eta + \frac{P_{a}}{g \rho_{0}} \right] + \frac{\tau_{sy} - \tau_{by}}{\rho_{0} H} + \frac{M_{y}}{H}, \qquad (2)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = 0, \tag{3}$$

здесь x, y, t – горизонтальные координаты и время;

 $U,\ V$  — средние по глубине компоненты вектора скорости течений по осям x и y соответственно;

 $\eta$  – отклонение свободной поверхности моря от невозмущенного состояния;

f – параметр Кориолиса; g – ускорение силы тяжести;

 $P_{\rm a}$  – атмосферное давление;

 $\rho_0 = 1024 \text{ кг/м}^3 - \text{средняя плотность морской воды;}$ 

 $H = h + \eta -$  динамическая глубина;

h — глубина моря;  $M_x = A_{\rm h} \Delta q_x$ ,  $M_y = A_{\rm h} \Delta q_y$  — компоненты горизонтальной турбулентной вязкости;

 $A_{\rm h} = 10 \, {\rm M}^2/{\rm c}$  – коэффициент горизонтальной турбулентной вязкости;

 $\Delta$  – оператор Лапласа по переменным x, y;

 $q_x = UH$ ,  $q_y = VH$  — компоненты вектора полных потоков.

Касательные напряжения трения в уравнениях (1), (2) задаются выражениями:

$$\tau_{sx} = \rho_{a} C_{a} W_{x} \sqrt{W_{x}^{2} + W_{y}^{2}}, \ \tau_{sy} = \rho_{a} C_{a} W_{y} \sqrt{W_{x}^{2} + W_{y}^{2}},$$
 (4)

$$\tau_{bx} = \rho_0 C_{\rm d} U \sqrt{U^2 + V^2} , \ \tau_{by} = \rho_0 C_{\rm d} V \sqrt{U^2 + V^2} , \tag{5}$$

где  $\rho_a = 1$  кг/м<sup>3</sup>– плотность воздуха;

 $W_{x}$ ,  $W_{y}$  – компоненты вектора скорости приводного ветра;

 $C_{\rm a} = 0.001(0.75 + 0.067\sqrt{W_{x}^{2} + W_{y}^{2}})$  — коэффициент поверхностного трения;

 $C_{\rm d} = 0.0025$  — коэффициент донного трения.

В основе численного алгоритма модели лежит метод конечных элементов, использующий треугольные элементы и линейные базисные функции<sup>1</sup>. Аппроксимация по времени проводится методом конечных разностей. Моделирование выполнялось в режиме параллельных вычислений на основе технологии MPI.

При заданных полях ветра и атмосферного давления численное моделирование выполнялось на двух вложенных неструктурированных сетках. Первая сетка покрывает весь Азово-Черноморский бассейн и содержит 20146 конечных элементов (рис. 2). Вторая сетка включает залив Донузлав, прилегающую к нему акваторию и состоит из 66046 конечных элементов (рис. 3). Разными цветами на рис. 2, 3 показано разбиение расчетных узлов между отдельными процессорами. Результаты расчетов на первой сетке использовались в качестве граничных условий на жидком контуре второй области.

Luettich R.A., Westerink J.J. Formulation and Numerical Implementation of the 2D/3D ADCIRC. 2004. http://adcirc.org/adcirc\_theory\_2004\_12\_08.pdf

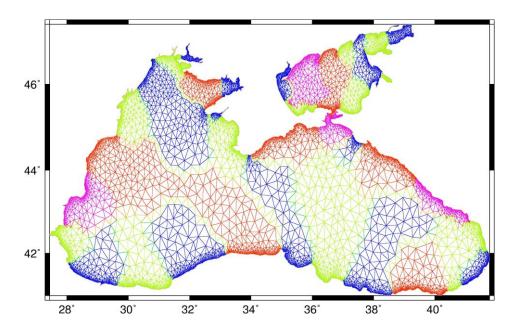


Рис. 2. Неструктурированная расчетная сетка для моделирования сгонно-нагонных колебаний в Азово-Черноморском бассейне

Fig. 2. Unstructured computational grid for simulating surges in the Azov-Black Sea basin

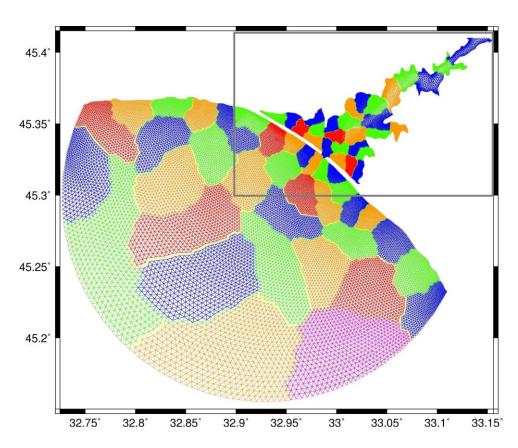


Рис. 3. Неструктурированная расчетная сетка для моделирования сгонно-нагонных колебаний в заливе Донузлав и прилегающей акватории Черного моря

Fig. 3. Unstructured computational grid for simulating surge fluctuations in the Donuzlav Bay and the adjacent Black Sea water area

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Интенсивность и продолжительность сгонно-нагонных колебаний в заливе Донузлав определяются особенностями атмосферных процессов, протекающими над самим заливом и прилегающей акваторией Черного моря. При определенных синоптических ситуациях, характеризующихся сильными ветрами, на отдельных участках акватории залива могут возникать значительные подъемы или спады уровня.

Согласно данным глобального атмосферного ре-анализа ERA-Interim за период 1979–2017 гг. (apps.ecmwf.int<sup>1</sup>), статистические характеристики скорости приземного ветра  $W = \sqrt{W_x^2 + W_y^2}$  для исследуемого района следующие: максимум – 25,8 м/с; среднее значение – 7,4 м/с; медиана – 7,0 м/с; среднеквадратическое отклонение – 3,5 м/с. В целом, наибольшую повторяемость (10%) имеет ветер северо-восточного направления. Со стороны моря наибольшей повторяемостью (6%) характеризуется юго-западный ветер.

Постоянный ветер разных направлений. В первом цикле численных экспериментов моделировалась ситуация, когда на поверхность моря воздействует однородный по пространству ветер заданного направления  $\theta$ . В начальный момент времени t=0 скорость течения, возвышения уровня моря имеют нулевые значения. При t>0 скорость ветра W линейно увеличивается и при  $t=t_{\rm m}$  достигает своего максимального значения  $W_m=15~{\rm m/c}$ , оставаясь далее неизменной. Атмосферное давление считается постоянным.

Представляет интерес выяснить, как при таком типе ветра происходит формирование сгонно-нагонных колебаний в заливе. Рассмотрим влияние параметра  $t_{\rm m}$  на интенсивность сгонно-нагонных колебаний. На рис. 4 показаны результаты расчета уровня моря в вершине залива (точка 1) для двух направлений ветра (юго-западного и северо-восточного) и трех значений  $t_{\rm m}$ . Общее время ветрового воздействия равнялось 48 ч.

Анализ этих зависимостей показывает, что под воздействием ветра в заливе формируется колебательный режим. Самые сильные колебания возникают на стадии увеличения скорости ветра. После того, как W достигает максимума и перестает меняться, колебания начинают затухать, и уровень постепенно приближается к некоторому постоянному значению, зависящему от направления ветра. С увеличением  $t_{\rm m}$  интенсивность колебаний уменьшается. Таким образом, чем быстрее увеличивается скорость ветра, тем более интенсивные колебания уровня моря он вызывает.

На рис. 5 и 6 для юго-западного ветра при  $t_{\rm m}=1$  ч приведены зависимости от времени модуля средней по глубине скорости  $u=\sqrt{U^2+V^2}$  и направления течения (здесь и далее направление течения и скорости ветра даны в декартовой системе координат). Черные кривые соответствуют точке, расположенной в проливе (точка 2), голубые кривые — точке, находящейся с внешней стороны северной косы (точка 3). Сопоставление эти вариантов показывает их существенное различие.

В проливе формируются реверсивные колебания скорости течения. Это проявляется в том, что направление течения периодически меняется с юго-западного (45°) на северо-восточное (225°). Эти колебания максимальны на стадии увеличения скорости ветра (максимум на этом интервале времени составляет 0,6 м/с). Со временем происходит их затухание, и средняя по глубине скорость течения приближается к нулю, т.е. расход воды в проливе также стремится к нулю (объемы втекающей и вытекающей в пролив воды становятся одинаковыми).

\_

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> ECMWF | ERA Interim, Daily. Электронный pecypc: https://apps.ecmwf.int/datasets/data/interim-full-daily/levtype=sfc (дата обращения 05.03.2021).

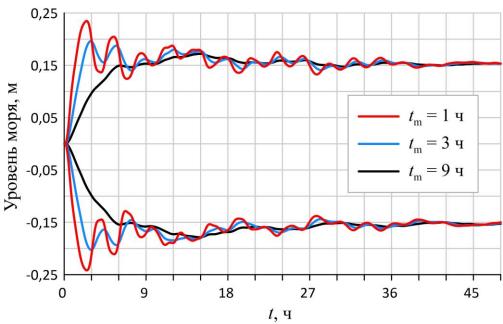


Рис. 4. Колебания уровня моря в вершине залива Донузлав (точка 1) для разных значений  $t_{\rm m}$  при  $W_{\rm m}=15~{\rm m/c}$ . Положительные значения уровня моря соответствуют юго-западному направлению ветра, отрицательные — северо-восточному

Fig. 4. Sea level fluctuations at the top of Donuzlav Bay (point 1) for different values of  $t_{\rm m}$  at  $W_{\rm m}=15$  m/s. Positive sea level values correspond to the southwest wind direction, negative — to the northeast

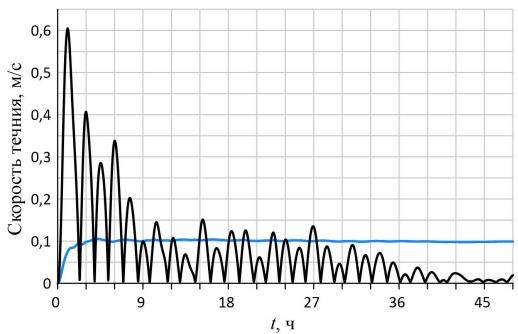


Рис. 5. Модуль скорости течений в проливе межу заливом Донузлав с морем (черная кривая), и с внешней стороны северной косы (голубая кривая) для юго-западного ветра при  $t_m=1$  ч и  $W_m=15$  м/с

Fig. 5. Modulus of current velocity in the strait between the Donuzlav Bay and the sea (black curve), and on the outer side of the northern spit (blue curve) for the southwestern wind at  $t_m = 1$  h and  $W_m = 15$  m/s

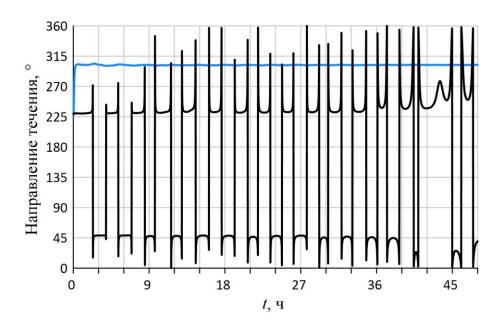


Рис. 6. Направление скорости течений в проливе межу заливом Донузлав с морем (черная кривая), и с внешней стороны северной косы (голубая кривая) для юго-западного ветра при  $t_m = 1$  ч и  $W_m = 15$  м/с

Fig. 6. The direction of the speed of currents in the strait between the Donuzlav Bay and the sea (black curve), and on the outer side of the northern spit (blue curve) for the southwestern wind at  $t_m = 1$  h and  $W_m = 15$  m/s

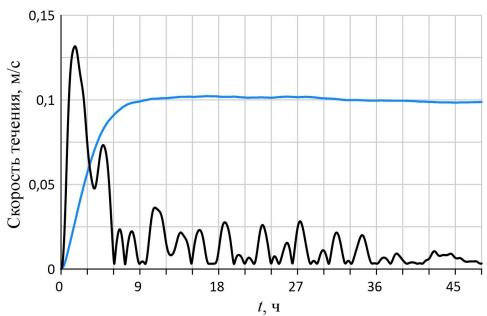


Рис. 7. Модуль скорости течений в проливе межу заливом Донузлав с морем (черная кривая), и с внешней стороны северной косы (голубая кривая) для юго-западного ветра при  $t_m = 9$  ч и  $W_m = 15$  м/с

Fig. 7. Modulus of current velocity in the strait between the Donuzlav Bay and the sea (black curve), and on the outer side of the northern spit (blue curve) for the southwestern wind at  $t_m = 9$  h and  $W_m = 15$  m/s

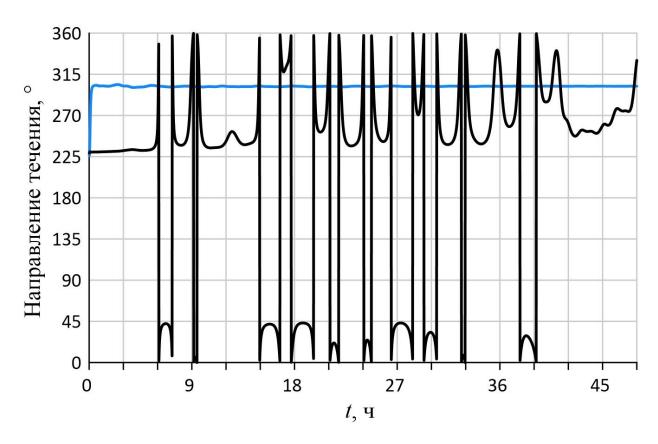


Рис. 8. Направление скорости течений в проливе межу заливом Донузлав с морем (черная кривая), и с внешней стороны северной косы (голубая кривая) для юго-западного ветра при  $t_m = 9$  ч и  $W_m = 15$  м/с

Fig. 8. The direction of the current velocity in the strait between the Donuzlav Bay and the sea (black curve), and on the outer side of the northern spit (blue curve) for the southwestern wind at  $t_m = 9 h$  and  $W_m = 15 m/s$ 

В свою очередь, за пределами залива колебания скорости течений не проявляются, а сами течения здесь оказываются более слабыми и однонаправленными. После выхода скорости ветра на стационарный режим скорость течения практически не меняется (~0,1 м/с).

На рис. 7, 8 для юго-западного ветра при  $t_{\rm m}=9$  ч приведены зависимости от времени модуля средней по глубине скорости и направления течения. Цвета кривых имеют тот же смысл, что и на рис. 4, 5. Качественно, приведенный здесь результат такой же, как и при  $t_{\rm m}=1$  ч (рис. 6). Только величина осцилляции скорости течения в проливе существенно меньше.

Проведенные расчеты позволяют отметить следующее. При воздействии ветра на акваторию залива Донузлав в полях уровня моря и течений возникают короткопериодные колебания. Их интенсивность определяется тем, насколько быстро скорость ветра достигает своего максимального значения: чем быстрее достигается максимум, тем больше интенсивность. Из-за узости пролива за пределами залива Донузлав эти колебания не прослеживаются. Указанные колебания имеют сейшевую природу, поскольку они проявляются в заливе и после прекращения действия ветра. Визуально периоды этих колебаний составляют 2–3 ч. В первом приближении периоды сейш для закрытого бассейна можно оценить по формуле Мериана [Rabinovich, 2009]:

$$T_n = \frac{2L}{n\sqrt{gH}},$$

где n – номер моды,

L – длина бассейна,

*g* – ускорение свободного падения,

H – средняя глубина бассейна.

При L = 26,5 км и H = 4 м период первой моды сейшевых колебаний  $T_1$  составляет  $\sim 2,4$  ч.

Таким образом, можно предположить, что под воздействием ветра в заливе возбуждается низшая мода сейшевых колебаний. Данное утверждение требует более детального рассмотрения с привлечением данных натурных наблюдений и не входило в залачи данного исследования.

#### Реальная синоптическая ситуация

Далее проводилось численное моделирование сгонно-нагонных колебаний в заливе Донузлав для реальной синоптической ситуации. Входными данными для модели ADCIRC служили поля скорости ветра и атмосферного давления над Азово-Черноморским бассейном за период 5-15 ноября 2007 г. из метеорологической модели SKIRON $^1$  с дискретностью по времени 2 ч и пространственным разрешением  $0,1^\circ$ . В этот период в Черном море возник экстремальный шторм, вызванный прохождением с юго-запада на северо-восток глубокого атмосферного циклона

На рис. 9 приведены зависимости от времени скорости ветра, направления ветра и уровня моря в районе залива Донузлав. Черная кривая на нижнем рисунке соответствует вершине залива (точка 1), голубая кривая − внешняя сторона северной косы (точка 3). Как видно, штормовая ситуация в районе залива Донузлав получила свое максимальное развитие 11 ноября. В это время произошла быстрая смена направления ветра с юговосточного (135½) на западное (0½). При этом скорость ветра усилилась с 9−11 м/с до 15−21 м/с. Это спровоцировало резкий подъем (до 0,5 м) уровня моря в вершине залива и стало причиной сильного опускания уровня в юго-западной части. За пределами залива подъем уровня достигал 0,35 м. Анализ расчетов показал, что в период шторма наибольшее усиление скорости течений (до 0,6 м/с) происходит в проливе, что обусловлено усилением водообмена между заливом и морем.

## Визуализация модельных полей

В настоящей работе для графического отображения результатов численного моделирования гидродинамических полей применялась адаптированная авторами фортран-программа FigureGen [Dietrich et al., 2013], использующая утилиты картографического пакета Generic Mapping Tools (GMT). В качестве примера, на рис. 10, 11 показаны пространственные распределения уровня моря в заливе Донузлав для двух моментов времени: 02:00 ч и 08:00 ч 11 ноября 2007 г. Полная анимация синоптической ситуации 5–15 ноября 2007 г. представлена на сайте МГИ РАН <sup>2</sup>.

SKIRON – Regional, Forecast Europe - Mediterranian Sea. Электронный ресурс: forecast.uoa.gr/en/forecast-maps/skiron

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Вычислительный кластер МГИ РАН. fomin.hpc-mhi.org/donuzlav/storm1

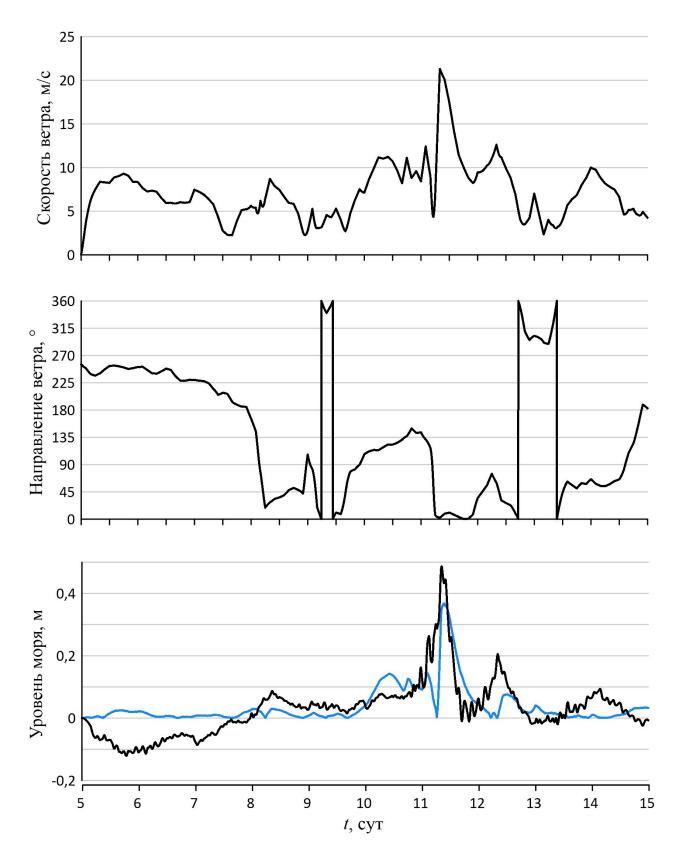


Рис. 9. Скорость ветра, направление ветра и колебания уровня моря в период 5—15 ноября  $2007~\varepsilon$ .

Fig. 9. Wind speed, wind direction and sea level fluctuations during November 5–15, 2007

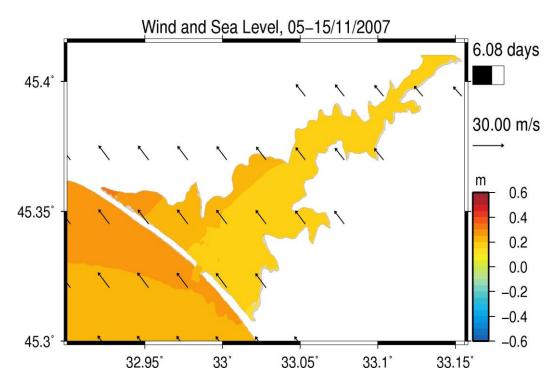


Рис. 10. Ветер и поле уровня моря в заливе Донузлав, соответствующее 02:00 11 ноября 2007 г.

Fig. 10. Wind and sea level field in Donuzlav Bay corresponding to 02:00 on November 11, 2007

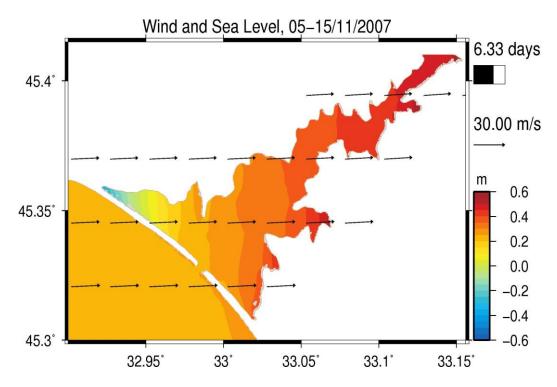


Рис. 11. Ветер и поле уровня моря в заливе Донузлав, соответствующее 08:00 11 ноября 2007 г.

Fig. 11. Wind and sea level field in Donuzlav Bay corresponding to 08:00 on November 11, 2007

## ВЫВОДЫ

Выполнено численное моделирование сгонно-нагонных колебаний в заливе Донузлав. Анализ результатов моделирования позволил выявить следующие особенности динамики вод в заливе.

Показано, что под воздействием однородного по пространству ветра на акваторию залива Донузлав в полях уровня моря и течений возникают короткопериодные колебания. Интенсивность этих колебаний определяется тем, насколько быстро скорость ветра достигает своего максимального значения: чем быстрее достигается максимум, тем интенсивнее колебания. Указанные колебания имеют природу сейш. Из-за узости пролива за пределами залива они не проявляются.

Выполнено моделирование экстремальной штормовой ситуации, возникшей в Черном море 11 ноября 2007 г. В период шторма произошла быстрая смена направления ветра с юго-восточного на западное с одновременным усилением скорости ветра до 15—21 м/с. Это спровоцировало резкий подъем уровня моря в вершине залива до 0,5 м. За пределами залива подъем уровня достигал 0,35 м. В период шторма наибольшее усиление скорости течений (до 0,6 м/с) происходит в проливе, что обусловлено усилением водообмена между заливом и морем.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Численное моделирование сгонно-нагонных колебаний в заливе Донузлав проводилось в рамках темы Морского гидрофизического института РАН № 0555-2021-0005 «Прибрежные исследования».

#### **ACKNOWLEDGEMENTS**

Numerical modeling of surge oscillations in the Donuzlav bay was carried out within the framework of the Marine Hydrophysical Institute of the RAS No. 0555-2021-0005 «Coastal Research».

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. *Андросович А.И., Иванов В.А., Михайлова Э.Н., Шапиро Н.Б.* Моделирование ветровых течений в озере Донузлав. Морской гидрофизический журнал, 1996. № 2. С. 15–26.
- 2. Горячкин Ю.Н., Иванов В.А. Уровень Черного моря: прошлое, настоящее и будущее. Севастополь: МГИ НАН Украины, 2006. 210 с.
- 3. *Горячкин Ю.Н., Иванов В.А., Репетин Л.Н., Хмара* Т.Н. Сейши в Севастопольской бухте. Труды УкрНИГМИ, 2002. Вып. 250. С. 342–353.
- 4. *Иванов В.А., Коновалов А.В., Манилюк Ю.В., Черкесов Л.В.* Математическое моделирование сгонно-нагонных колебаний в Черном море. Метеорология и гидрология, 1999. № 11. С. 56–63.
- 5. Ломакин П.Д., Рябушко В.И., Чепыженко А.И., Щуров С.В. Контроль системы течений и полей концентрации общего взвешенного и растворенного органического веществ в озере Донузлав в мае 2019 года. Системы контроля окружающей среды, 2021. № 1 (43). С. 87–94. DOI: 10.33075/2220-5861-2021-1-87-94.
- 6. *Медведев И.П., Архипкин В.С.* Колебания уровня моря в Голубой бухте (Геленджик). Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2015. No 3. P. 70–78.

- 7. *Немировский М.С., Ковригина Н.П.* Динамика вод озера Донузлав. Экология моря, 2000. Вып. 51. С. 10–13.
- 8. *Фомин В.В., Иванов В.А.* Объединенная численная модель течений, волнения и транспорта наносов озера Донузлав. Морской гидрофизический журнал, 2006. № 2. С. 1–23.
- 9. *Фомин В.В., Лазоренко Д.И., Иванча Е.В.* Моделирование сейш в Балаклавской бухте. Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. Сборник научных трудов, 2017. № 3. С. 32–39.
- 10. *Фомичева Л.А.*, *Рабинович А.Б.*, *Демидов А.Н.* Уровень моря. Проект «Моря СССР». Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. 4. Черное море. Вып. 1. СПб.: Гидрометеоиздат, 1991. С. 329–354.
- 11. *Bazykina A.Yu., Dotsenko S.F.* Propagation of Tsunami-like Surface Long Waves in the Bays of a Variable Depth. Physical Oceanography, 2016. No 4, pp. 3–11.
- 12. Dietrich J.C. et al. Real-Time Forecasting and Visualization of Hurricane Waves and Storm Surge Using SWAN+ADCIRC and FigureGen. In: Dawson C., Gerritsen M. (eds) Computational Challenges in the Geosciences. The IMA Volumes in Mathematics and its Applications. Springer, New York, NY. 2013. V. 156. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-7434-0 3.
- 13. Luettich Jr. R.A., Westerink J.J., Scheffner N.W. ADCIRC: an advanced three-dimensional circulation model for shelves coasts, and estuaries, report 1: theory and methodology of ADCIRC-2DDI and ADCIRC-3DL. Dredging research program technical report DRP-92-6. Vicksburg: U.S. Army Engineers Waterways Experiment Station, 1992. 137 p.
- 14. *Manilyuk Y.V, Lazorenko D.I., Fomin V.V.* Investigation of Seiche Oscillations in the Adjacent Bays by the Example of the Sevastopol and the Quarantine Bays. Physical Oceanography, 2020. No 27(3). P. 242–256.
- 15. Rabinovich A.B. Seiches and harbor oscillations. In: Handbook of Coastal and Ocean Engineering / Ed. Y.C. Kim. Chapter 9. Singapore: World Scientific Publ., 2009. P. 193–236.

#### REFERENCES

- 1. *Androsovich A.I., Ivanov V.A., Mihajlova E.N., Shapiro N.B.* Modeling wind currents in Donuzlav lake. Physical Oceanography, 1996. No 2. P. 15–26.
- 2. *Bazykina A.Yu., Dotsenko S.F.* Propagation of Tsunami-like Surface Long Waves in the Bays of a Variable Depth. Physical Oceanography, 2016. No 4. P. 3–11.
- 3. Dietrich J.C. et al. Real-Time Forecasting and Visualization of Hurricane Waves and Storm Surge Using SWAN+ADCIRC and FigureGen. In: Dawson C., Gerritsen M. (eds) Computational Challenges in the Geosciences. The IMA Volumes in Mathematics and its Applications. Springer, New York, NY. 2013. V. 156. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-7434-0 3.
- 4. Fomicheva L.A., Rabinovich A.B., Demidov A.N. Sea level. Project «Sea of the USSR». Hydrometeorology and Hydrochemistry of the USSR Seas. V. 4. Black Sea. Issue (1). St. Petersburg: Gidrometeoizdat, 1991. P. 329–354.
- 5. Fomin V.V., Ivanov V.A. Combined numerical model of currents, waves and sediment transport of Lake Donuzlav. Physical Oceanography, 2006. No 2. P. 1–23.
- 6. Fomin V.V., Lazorenko D.I., Ivancha E.V. Numerical simulation of seiches in the Balaklava Bay. Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea, 2017. No 3. P. 32–39.

- 7. *Goryachkin Y.N., Ivanov V.A.* Black Sea level: past, present and future. Sevastopol: MHI of the NAS of Ukraine, 2006. 210 p.
- 8. Goryachkin Y.N., Ivanov V.A., Repetin L.N., Hmara T.N. Seiches in the Sevastopol Bay. Proceedings of the Ukrainian Scientific Research Hydrometeorological Institute, 2002. No 250. P. 342–353.
- 9. *Ivanov V.A., Konovalov A.V., Manilyuk Y.V., Cherkesov L.V.* Mathematical modeling of surge oscillations in the Black Sea. Meteorology and Hydrology, 1999. No 11. P. 56–63.
- 10. Luettich Jr. R.A., Westerink J.J., Scheffner N.W. ADCIRC: an advanced three-dimensional circulation model for shelves coasts, and estuaries, report 1: theory and methodology of ADCIRC-2DDI and ADCIRC-3DL. Dredging research program technical report DRP-92-6. Vicksburg: U.S. Army Engineers Waterways Experiment Station, 1992. 137 p.
- 11. *Lomakin P.D., Ryabushko V.I., Chepyzhenko A.I., Shchurov S.V.* Control of the system of currents and fields of concentration of total suspended and dissolved organic matter in Lake Donuzlav in May 2019. Sistemy kontrolya okruzhayushchej sredy, 2021. No 1 (43). P. 87–94. DOI: 10.33075/2220-5861-2021-1-87-94.
- 12. *Manilyuk Y.V, Lazorenko D.I., Fomin V.V*. Investigation of Seiche Oscillations in the Adjacent Bays by the Example of the Sevastopol and the Quarantine Bays. Physical Oceanography, 2020. No 27(3). P. 242–256.
- 13. *Medvedev I.P., Arhipkin V.S.* Sea level fluctuations in the Blue Bay (Gelendzhik). Moscow University Bulletin, 2015. Series 5. Geography. No 3. P. 70–78.
- 14. *Nemirovskij M.S., Kovrigina N.P.* The dynamics of the waters of Lake Donuzlav. Ekologiya morya, 2000. No 51. P. 10–13.
- 15. Rabinovich A.B. Seiches and harbor oscillations. In: Handbook of Coastal and Ocean Engineering / Ed. Y.C. Kim. Chapter 9. Singapore: World Scientific Publ., 2009. P. 193–236.