

УДК 551.465(262.5)

© 2010

Д. В. Алексеев, академик НАН України **В. А. Иванов**, **Е. В. Иванча**,
В. В. Фомин, член-корреспондент НАН України **Л. В. Черкесов**

Моделирование процесса эрозии донных осадков в Каркинитском заливе Черного моря во время шторма 10–11 ноября 2007 г.

Виконано математичне моделювання просторового перерозподілу донних відкладів типу мулу в Каркінітській затоці Чорного моря під час шторму 10–11 листопада 2007 р. Було використано масиви прогностичного вітру та атмосферного тиску SKIRON. Проаналізований зв'язок структури полів придонних течій та концентрації завислих донних відкладів зі змінами вітрової ситуації, які обумовлені проходженням циклону. Показано, що найбільш піддані ерозії області дна біля Бакальської коси і Бакальської банки, в східній частині Каркінітської затоки та в Джарилгацькій затоці.

Каркинитский залив — крупнейший залив северо-западной части Черного моря. В силу морфологических особенностей (глубины 10–35 м; сложный рельеф дна, сложенного из песчано-илистых с добавлением ракушечника осадков; наличие островов и кос) залив является районом интенсивных морфодинамических процессов. Под влиянием природных факторов, а также в результате деятельности человека меняются конфигурация берегов, рельеф дна, площадь, очертания и даже число островов. Так, в последнее время вследствие размыва Бакальской косы появилась угроза затопления илом пляжей, расположенных на берегах оз. Бакал [1]. Особенно интенсивный размыв Бакальской косы имел место во время катастрофического шторма 10–11 ноября 2007 г., развитие которого происходило следующим образом [2]. Ночью с 10 на 11 ноября с Балканского региона на акваторию Черного моря вышел южный циклон и стал перемещаться в сторону Крыма. К началу 11 ноября в районе Крымского полуострова юго-восточный ветер усилился до 10–15 м/с. К 9 ч ветер достиг скорости 20–25 м/с и начал менять направление на западное. 12–13 ноября центр циклона сместился с Крымского полуострова на север, а над акваторией моря сохранилась ложбина с дождями, низкой облачностью и скоростью ветра не более 7–12 м/с. В данном сообщении приведены результаты численного моделирования процессов эрозии и седиментации мелкодисперсных донных осадков типа ила в Каркинитском заливе во время этого шторма.

1. Постановка задачи и метод решения. При расчете транспорта мелкодисперсных донных осадков нестационарными течениями в качестве гидродинамического блока при-

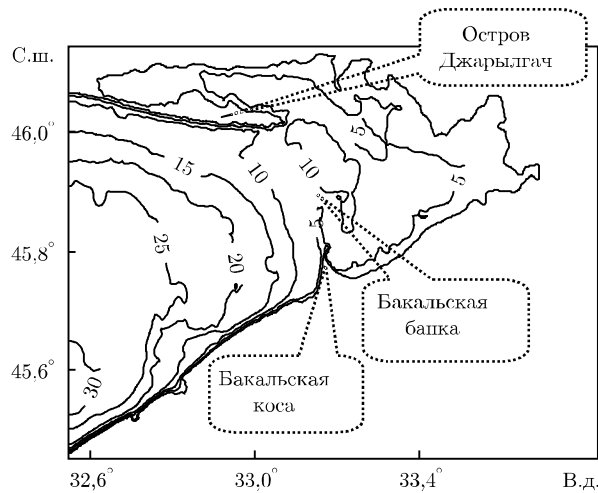


Рис. 1. Рельеф дна Каркинитского залива

менялся баротропный вариант Принстонской океанологической модели *POM* [3], адаптированной к условиям Черноморского региона [4]. Для задания атмосферного воздействия использовались массивы ветра и атмосферного давления, полученные из региональной прогностической модели *SKIRON* [5]. Данная модель обеспечивает атмосферные поля с пространственным разрешением 10×10 км и дискретностью по времени 2 ч.

Для определения концентрации однородных по гранулометрическому составу донных осадков, содержащихся в морской воде, совместно с гидродинамическим блоком решалось уравнение переноса–диффузии–осаждения взвеси [6]. Изменение запаса осадков на дне происходило за счет процессов эрозии и седиментации. Согласно теории Кроне [7], эрозия начинается, когда придонные напряжения трения превышают критическое значение τ_{ce} , а седиментация имеет место, когда данные напряжения меньше критического значения τ_{cd} , и концентрация взвеси у дна отлична от нуля, причем $\tau_{ce} \geq \tau_{cd}$.

С целью обеспечения высокого пространственного разрешения расчеты полей скоростей течений и концентрации взвешенных донных осадков проводились на трех вложенных сетках. Первая из них с пространственным разрешением $7,8 \times 7,0$ км покрывала все Черное море. Вторая — с разрешением $1,6 \times 1,4$ км охватывала только северо-западную часть моря и имела открытую границу, проходящую по $45,4^\circ$ с. ш. Третья сетка покрывала Каркинитский залив (рис. 1) с разрешением 197×281 м, а ее открытая граница проходила вдоль $32,546^\circ$ в. д. Количество расчетных уровней по вертикали в каждом случае принималось равным 15. Для более точного описания процессов в пограничных слоях расчетные уровни вблизи дна и свободной поверхности сгущались.

Численный эксперимент проводился с 1 ноября 2007 г. для того, чтобы обеспечить согласование гидродинамических полей с существующей на момент начала шторма ветровой ситуацией. На 0 ч 10 ноября задавалась нулевая концентрация взвешенных донных осадков, а их запас на дне предполагался горизонтально однородным и равным $0,3$ кг/м². Значения критических напряжений для эрозии $\tau_{ce} = 0,13$ Н/м² и седиментации $\tau_{cd} = 0,1$ Н/м² брали из работы [6]. Коэффициенты горизонтальной и вертикальной диффузии принимались равными 10 и 10^{-4} м²/с соответственно [4]. Скорость оседания взвеси $w_s = 10^{-5}$ м/с. Такое значение, согласно формуле Стокса [8] $w_s = (\rho_s/\rho - 1)gD_s^2/18\nu$, соответствует мелкодисперс-

ным донным осадкам типа ила с размером частиц D_s около 3 мкм, где $\rho_s = 2650 \text{ кг/м}^3$ — плотность донных осадков; $\rho = 1015 \text{ кг/м}^3$ — плотность морской воды; g — ускорение свободного падения; $\nu = 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ — кинематический коэффициент вязкости чистой воды.

2. Анализ результатов численных экспериментов. Рассмотрим изменение пространственного распределения взвешенных донных осадков и их запаса на дне Каркинитского залива в зависимости от структуры полей течений на разных этапах развития штормовой ситуации 10–11 ноября 2007 г.

Весь день 10 ноября над акваторией Каркинитского залива преобладал юго-восточный ветер силой 9–10 м/с, сменившийся к вечеру на восточный. При этом атмосферное давление постепенно падало. Вблизи дна после ряда изменений направлений течений сформировались два циклонических круговорота в восточной и западной частях залива. Этот процесс сопровождался локальным увеличением скоростей придонных течений в районах с особенностями береговой линии и профиля дна. Большую часть времени 10 ноября течения у дна были недостаточно интенсивными для начала процесса эрозии. Только в моменты локального усиления течений у северной оконечности Бакальской косы над Бакальской банкой неоднократно возникали районы взмучивания шириной до нескольких километров, существовавшие 2–3 ч. В результате этого к концу дня во всей толще воды над Бакальской банкой образовалась область с содержанием взвеси более $0,1 \text{ г/м}^3$, которая со временем стала переноситься течениями на восток.

Развитие штормовой ситуации 11 ноября было обусловлено прохождением над Черным морем интенсивного циклона. Выход на акваторию Каркинитского залива около полуночи передней части атмосферного возмущения сопровождался сменой направления ветра с восточного на юго-восточное и его усилением до 11 м/с. Это привело к заметной интенсификации течений в придонном слое вдоль северо-западного побережья залива. В результате там образовалась цепочка областей эрозии, которые исчезли к 3 ч. К данному моменту времени ветер несколько ослаб, и в придонном слое усилились течения (до 0,5–0,7 м/с), направленные с запада на восток против ветра. Следствием этого явилось взмучивание донных осадков в районе Бакальской банки по всей ширине залива, что нашло свое отражение в распределении взвеси у дна. Однако до 5 ч образовавшиеся потоки взвешенных донных осадков не проявлялись на поверхности моря.

Между 5 и 6 ч 11 ноября атмосферное давление в районе залива упало до наименьшего значения, что свидетельствовало о прохождении “глаза” циклона. При этом наблюдалось ослабление юго-восточного ветра, уменьшение скоростей течений и практически полное прекращение эрозии донных осадков. Потоки взвеси, сформировавшиеся при прохождении передней части циклона, достигли поверхности моря у северной оконечности Бакальской косы.

Перемещение над акваторией Каркинитского залива тыловой части циклона сопровождалось усилением ветра до 25 м/с в 8–10 ч и сменой его направления на северо-западное и западное. В придонном слое в направлении течений преобладала меридиональная составляющая и лишь над Бакальской банкой, где скорости увеличивались до 0,9 м/с, существенной была составляющая, направленная с запада на восток. В результате интенсификации гидродинамических процессов в заливе возобновились эрозионные процессы. В 7–8 ч у северо-западного побережья наблюдалась протяженная область эрозии. Процесс взмучивания, начавшийся у северной оконечности Бакальской косы, со временем распространился на север на всю ширину Каркинитского залива и на Джарылгачский залив. В поле концентрации взвеси у дна области со значениями более $0,1 \text{ г/м}^3$ соответствовали районам,

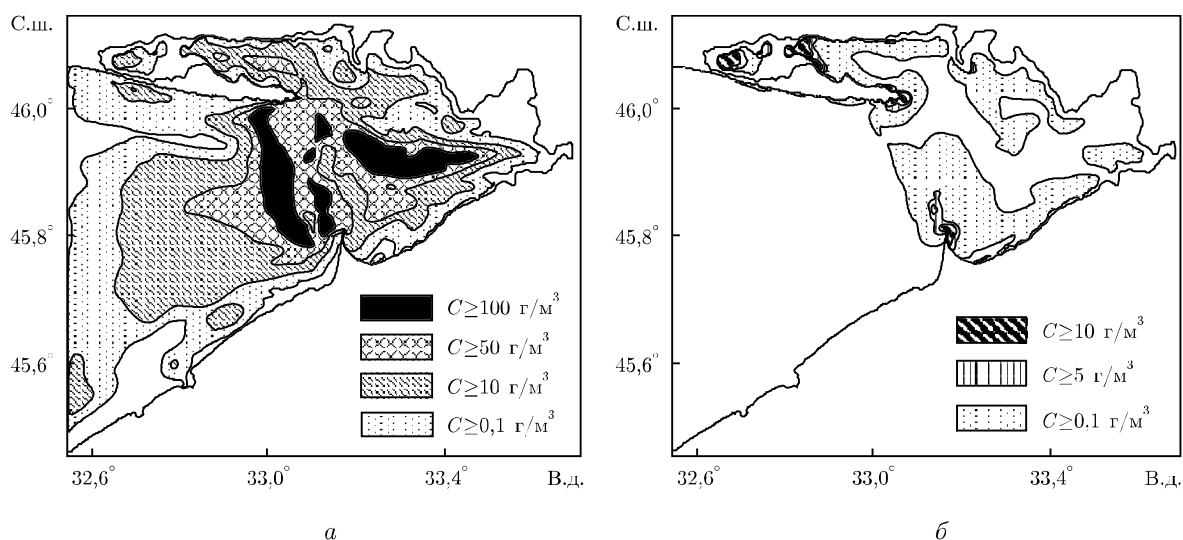


Рис. 2. Концентрация взвешенных донных осадков C ($\text{г}/\text{м}^3$) на расстоянии 1 м от дна (а) и на поверхности моря (б) в 16 ч 11 ноября 2007 г.

где происходила эрозия. Вблизи Бакальской банки в результате переноса течениями максимальные значения концентрации взвеси имели место к востоку от центра области эрозии. На поверхности моря под воздействием течений поток взвешенных донных осадков обогнул Бакальскую косу с севера на юго-восток и соединился с областью взвеси, которая возникла 10 ноября еще до прихода циклона.

При последующем продвижении циклона (после 10 ч 11 ноября) западные ветры начали заметно ослабевать, но до 13 ч они еще превышали 20 м/с. У дна сформировалась система компенсирующих течений со скоростями до 0,8 м/с, в которой преобладал перенос против ветра с востока на запад. Именно под воздействием этих течений возникли наиболее протяженные области эрозии, которые сначала заняли восточную часть залива, а к 13 ч и западную. Содержание взвеси в придонном слое начало превышать $0,1 \text{ г}/\text{м}^3$ практически по всей акватории, однако значений более $50\text{--}100 \text{ г}/\text{м}^3$ концентрация достигла в северо-восточной части Каркинитского залива, в Джарылгачском заливе, а также восточнее и западнее Бакальской банки. В последнем случае заметным оказался перенос донных осадков течениями на запад. Поэтому наиболее интенсивный поток взвешенных донных осадков выходил на поверхность моря западнее северной оконечности Бакальской косы, хотя обширная область со значительным содержанием взвеси располагалась над всей Бакальской банкой.

При дальнейшем ослаблении ветра скорости течений в придонном слое постепенно начали менять направления вплоть до противоположных, а их величины уменьшились к 18 ч до 0,3 м/с. Вследствие этого области эрозии стали сокращаться в размерах, распадаясь на ряд локальных очагов и полностью исчезая в ночь с 11 на 12 ноября. У дна максимальное содержание взвеси имело место в 15–16 ч. Это проявилось в превышении концентрацией значения $200 \text{ г}/\text{м}^3$ и в увеличении площадей областей с концентрацией $50\text{--}100 \text{ г}/\text{м}^3$, причем эти области продолжали смещаться к западу (рис. 2, а). На поверхности моря наибольшее содержание взвешенных донных осадков наблюдалось над Бакальской банкой, вдоль восточной части Бакальской косы и в Джарылгачском заливе (см. рис. 2, б). К концу 11 ноября

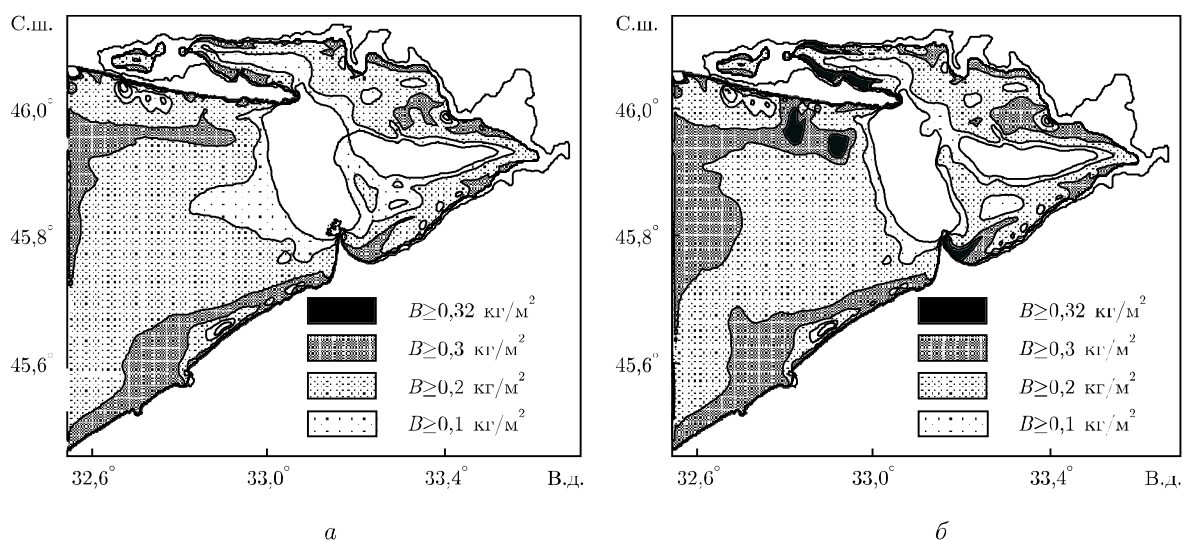


Рис. 3. Запас осадков на дне B ($\text{кг}/\text{м}^2$) в 0 ч 12 ноября 2007 г. (а) и в 0 ч 14 ноября 2007 г. (б)

в восточной части Каркинитского залива по всей глубине концентрация взвеси превосходила $0,1 \text{ г}/\text{м}^3$.

В результате процесса эрозии на разных этапах движения циклона запас осадков на дне оказался существенно истощенным в широкой полосе от Бакальской косы до острова Джарылгач и в более узкой полосе в восточной части Каркинитского залива, которая вытянута в зональном направлении (рис. 3, а). В значительно меньших по пространственным масштабам областях истощение запаса осадков наблюдалось в Джарылгачском заливе и вдоль северного побережья западной части Каркинитского залива.

12 ноября преобладали юго-западные и западные ветры, скорость которых постепенно уменьшалась. При этом остаточные колебания скоростей течений, являвшиеся следствием прохождения циклона над акваторией залива, практически полностью прекратились к 13 ноября.

С прекращением шторма концентрация взвешенных донных осадков у дна стала постепенно уменьшаться, но их пространственное распределение до начала 13 ноября изменилось мало. На поверхности, наоборот, практически до конца 12 ноября происходило увеличение содержания взвеси за счет расширения областей с концентрацией более $10 \text{ г}/\text{м}^3$. Наибольшие значения концентрации наблюдались уже не только у Бакальской косы, но и значительно севернее, а также в Джарылгачском заливе. 13 ноября за счет диффузии и седиментации содержание взвешенных донных осадков на поверхности начало уменьшаться. Западная часть Каркинитского залива по-прежнему оставалась свободной от взвеси с концентрацией более $0,1 \text{ г}/\text{м}^3$.

К концу 13 ноября в результате процесса седиментации заметное накопление донных осадков прослеживалось вдоль восточной части Бакальской косы в виде вытянутой на северо-восток полосы, северо-западнее Бакальской банки и вдоль берегов Джарылгачского залива (см. рис. 3, б).

Таким образом, 11 ноября 2007 г. перемещение над акваторией Каркинитского залива передней части циклона вызвало заметную эрозию мелкодисперсных донных осадков только в районе Бакальской банки. Наиболее интенсивные эрозионные процессы, охватывающие

практически всю акваторию залива, имели место при ослаблении ветров тыловой части циклона, когда у дна образовалась система течений, направленных против ветра. После прекращения шторма запас мелкодисперсных донных осадков оказался существенно истощенным на участках дна от Бакальской косы до о. Джарылгач, в Джарылгачском заливе, в восточной части Каркинитского залива и вдоль северного побережья его западной части. Накопление донных осадков в результате процесса седиментации происходило восточнее Бакальской косы, северо-западнее Бакальской банки и вдоль берегов Джарылгачского залива.

1. <http://www.jankoy.org.ua/page.php?al=bakalsk>.
2. Матишов Г. Г., Бердников С. В., Савицкий Р. М. Экосистемный мониторинг и оценка воздействия разливов нефтепродуктов в Керченском проливе. Аварии судов в ноябре 2007 г. – Ростов-на-Дону: Изд-во ЮНЦ РАН, 2008. – 79 с.
3. Blumberg A. F., Mellor G. L. A description of three dimensional coastal ocean circulation model // Coastal and Estuarine Sci. – 1987. – 4. – P. 1–16.
4. Алексеев Д. В., Иванча Е. В., Фомин В. В. Математическое моделирование взмучивания донных осадков на северо-западном шельфе Черного моря при прохождении циклона // Доп. НАН України. – 2006. – № 3. – С. 104–110.
5. <http://forecast.uoa.gr>.
6. Burchard H., Bolding K., Villareal M. R. Three-dimensional modeling of estuarine turbidity maxima in a tidal estuary // Ocean Dynamics. – 2004. – 54, No 2. – P. 250–265.
7. Krone R. B. Flume studies of the transport of sediment in estuarial processes. – Final Report: Hydraulic Engineering Laboratory and Sanitary Engineering Research Laboratory. Univ. California, Berkeley, 1962. – 120 p.
8. Van Rijn L. C. Sediment transport, Part II: Suspended load transport // J. Hydraulic Engineering. – 1998. – 110, No 11. – P. 1613–1641.

Морской гидрофизический институт
НАН Украины, Севастополь

Поступило в редакцию 04.01.2010

D. V. Alekseev, Academician of the NAS of Ukraine **V. A. Ivanov**, **E. V. Ivancha**,
V. V. Fomin, Corresponding Member of the NAS of Ukraine **L. V. Cherkesov**

Simulation of the erosion process of sediments in the Karkinitsky Bay of the Black Sea during the storm on November 10–11, 2007

Numerical simulation of the spatial redistribution of bottom sediments of the silt type in the Karkinitsky Bay of the Black Sea during the storm on November 10–11, 2007 is carried out. SKIRON arrays of the prognostic wind and the atmospheric pressure are used. Interrelation of the structure of fields of bottom currents and the suspended sediment concentration with wind situation variations which are caused by the cyclone passing is analyzed. It is shown that bottom areas at the Bakal'skaya Spit and the Bakal'skaya Bank in the eastern part of the Karkinitsky Bay and in the Dzharlygachsky Bay are subjected to the erosion most of all.