

П.Д.Ломакин, А.И.Чепыженко, А.А.Чепыженко

*Морской гидрофизический институт РАН, г.Севастополь*

## **ГИДРОФИЗИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ И ЗАГРЯЗНЕНИЕ ВОД В РАЙОНЕ БЕРДЯНСКОЙ КОСЫ (АЗОВСКОЕ МОРЕ) В ДЕКАБРЕ 2007 ГОДА**

На основе данных океанографических экспедиционных исследований, проведенных 8 декабря 2007 г., рассмотрены особенности гидрофизических условий и оценена степень загрязнения вод Азовского моря у побережья Бердянской косы. Выявлены закономерности динамики взвешенного вещества и механизмы размыва косы в результате штормового нагона. Показано, что при катастрофическом подъеме уровня моря система вдольберегового течения при взаимодействии с неоднородностями дна в области подводного песчаного бара способствовала размыву восточного участка Бердянской косы и выносу взвеси в открытое море.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** *соленость, течения, общее взвешенное и растворенное органическое вещество, нефтепродукты, Азовское море*

**Введение.** В ноябре – декабре 2007 г. после мощного штормового нагона, сопровождавшегося катастрофическим подъемом уровня моря, существенно пострадали уникальные пляжи Бердянской косы. Также известно, что данный регион испытывает постоянно нарастающий антропогенный пресс.

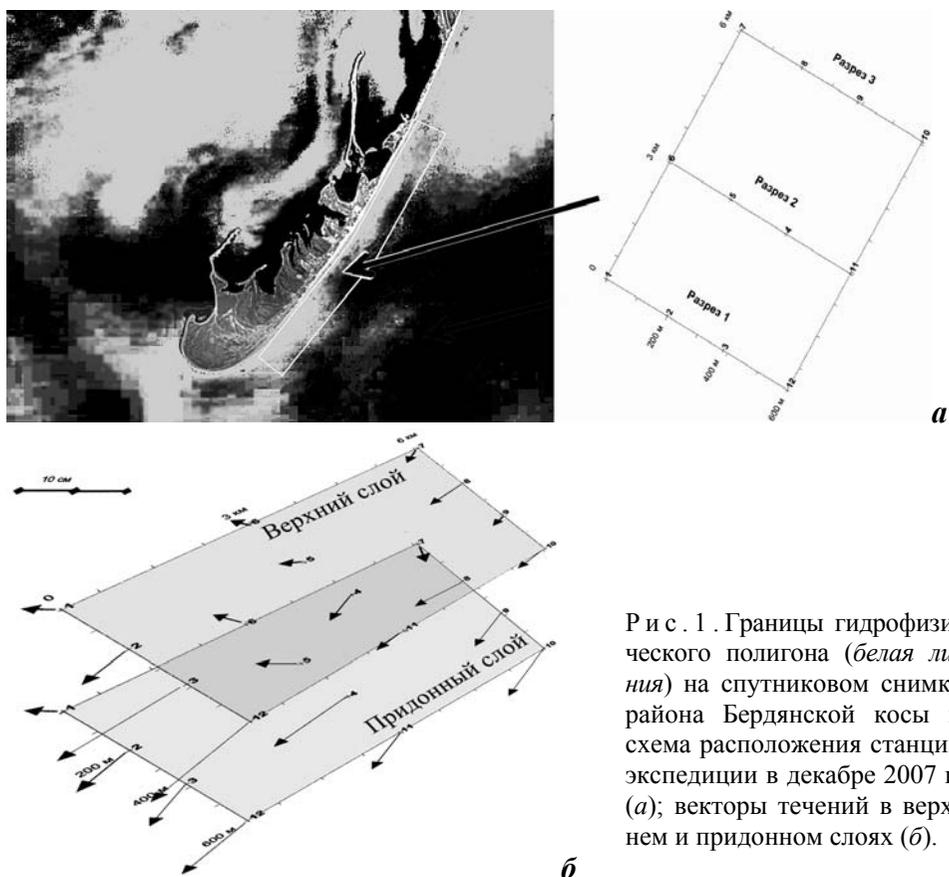
С целью выявления особенностей гидрофизических условий, оценки степени загрязнения вод и механизмов, вызвавших размыв береговой линии и дна у побережья Бердянской косы, здесь 8 декабря 2007 г. были выполнены комплексные гидрофизические исследования.

Экспедиция проведена сотрудниками Морского гидрофизического института НАНУ (МГИ) (г.Севастополь), Института биологии южных морей НАНУ (г.Севастополь), ЧерноморНИИПроект (г.Одесса).

**Материалы и методы.** На полигоне вдоль восточного побережья Бердянской косы были выполнены следующие виды работ: гидрографический промер, наблюдения за течениями, температурой воды, соленостью, содержанием общего взвешенного вещества, концентрацией растворенного органического вещества, растворенных в воде нефтепродуктов, а также мутностью вод.

Эксперимент реализован с борта килевого катера типа «Зодиак» на полигоне, включившим три разреза, ориентированных, примерно, по нормали к береговой черте. Акватория полигона захватывала южную оконечность косы, распространяясь на ее наиболее узкий и активно размываемый восточный участок (рис.1, а). Для удобства масштаб полигона вдоль линий разрезов (правая часть этого рисунка) увеличен в 4 раза.

Расстояние между разрезами – 3 км, протяженность каждого – около 700 – 800 м. Станции располагались таким образом, чтобы охватить все характерные морфометрические зоны побережья. Ближний к берегу ряд станций находился непосредственно у береговой линии (глубина 1,2 – 1,5 м). Следующий за ним ряд – над баром (~ 2 – 2,5 м). Два последних ряда – в мористой области полигона с глубиной 3 – 6 м.



Р и с . 1 . Границы гидрофизического полигона (белая линия) на спутниковом снимке района Бердянской косы и схема расположения станций экспедиции в декабре 2007 г. (а); векторы течений в верхнем и придонном слоях (б).

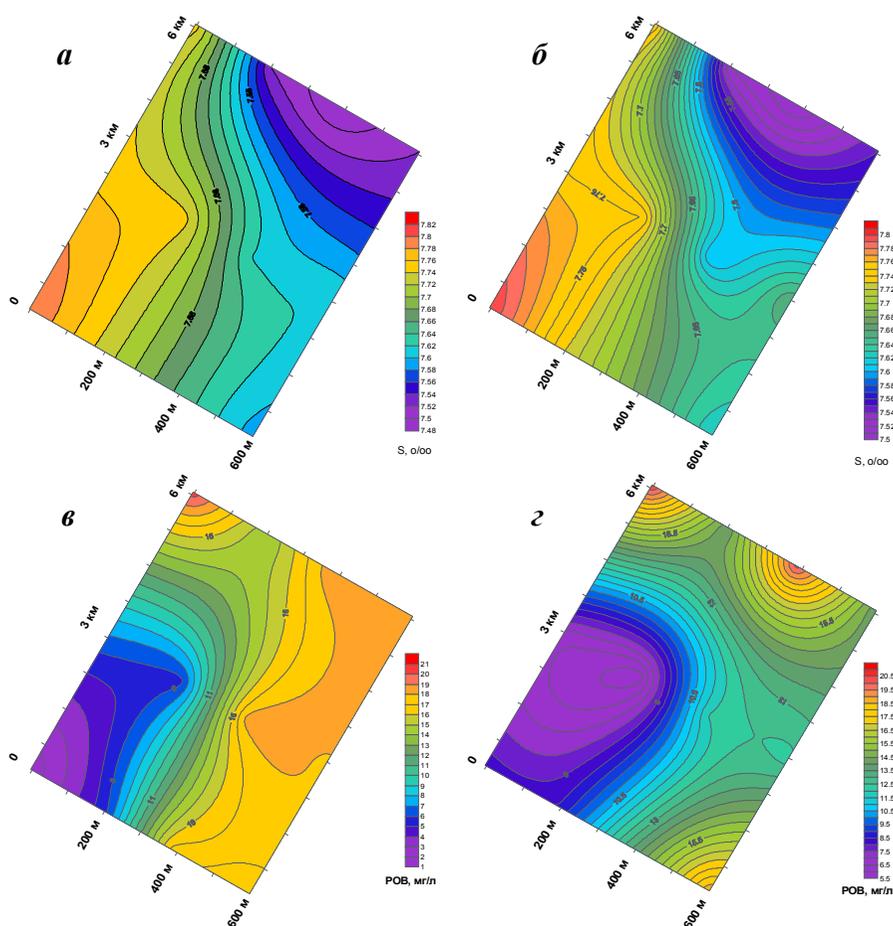
Все рассматриваемые параметры водной среды, кроме мутности, определялись на каждой станции полигона в верхнем слое моря и у дна при постановке катера на якорь. Мутность вод фиксировалась в зондирующем режиме.

Характеристики течения измерялись при помощи автономного регистратора МГИ-1301 с дискретностью в 1 мин. при диспозиции прибора на каждом горизонте от 10 до 30 мин., анализировались осредненные по каждой временной реализации векторы. Температура – глубоководными термометрами. Пробы воды на соленость, содержание общей взвеси, растворенного органического вещества и нефтепродуктов отбирались батометром Нансена и затем обрабатывались в лабораторных условиях в МГИ. Три последних параметра среды определялись оптическим методом на спектральном измерителе прозрачности *OSP-IPO* [1 – 3]. Концентрация растворенных нефтепродуктов оценивалась в относительных единицах (отн. ед.), показывающих, во сколько раз их реальная концентрация превосходит концентрацию, типичную для незагрязненных морских вод. Мутность регистрировалась оптическим зондом-мутномером [4] с шагом по глубине 0,25 м. Координаты станций фиксировались приемником *GPS*.

Экспериментальные работы были проведены в светлое время суток 8 декабря 2007 г., в маловетреную погоду, примерно, по истечению 0,5 суток после сильного шторма. Преобладала развитая зыбь от северо-востока. Сплошная облачность. Температура воздуха 3,9°C.

**Обсуждение результатов. Рельеф дна.** Промер дна выявил ряд количественных и качественных изменений в донном рельефе рассматриваемой акватории, ставшие следствием мощного нагона и катастрофического подъема уровня моря. Данные особо опасные явления были вызваны жестоким штормом 11 ноября 2007 г. Существенным образом пострадал берег в районе самой узкой части косы. Заметно деформировалось дно в районе бара. Здесь, примерно в центре полигона, обозначилось достаточно рельефное локальное поднятие дна (с превышением  $\sim 0,4$  м над окружающим фоном глубин), которое, как будет показано ниже, сыграло значимую роль в процессе размыва Бердянской косы.

**Течения.** Как на поверхности моря, так и у дна был зафиксирован достаточно устойчивый вдольбереговой поток преимущественно юго-западного направления (рис.1, б). В мористой области полигона его скорость достигала 12 – 18 см/с. Течение замедлялось над баром до 5 – 10 см/с, сохраняя при этом вдольбереговое направление. Непосредственно у берега скорость те-

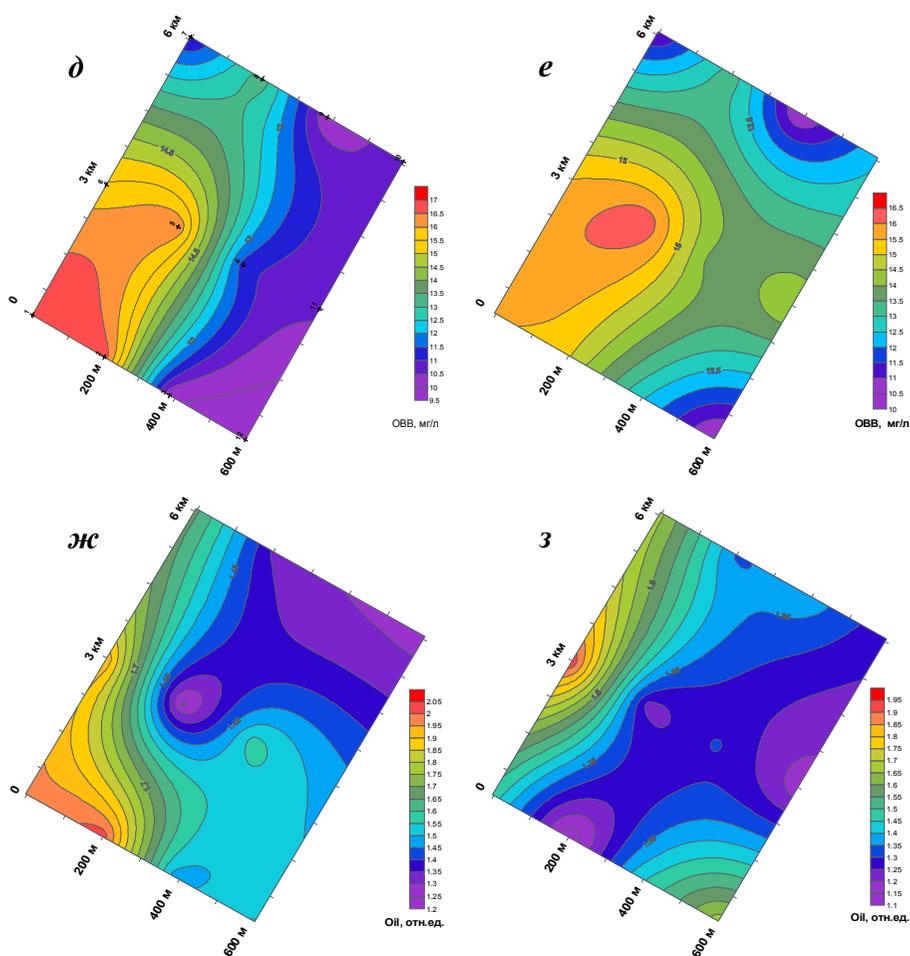


Р и с. 2. Распределение солёности, ‰ (а, б); концентрации растворенного органического вещества, мг/л (в, г); концентрации общего взвешенного вещества, мг/л (д, е); содержания нефтепродуктов, отн. ед. (ж, з), на поверхности (слева) и у дна (справа).

чения падала до 2 – 4 см/с. На двух прибрежных станциях (ст.1 и 8) в северной части полигона вектор скорости приобретал хорошо выраженную нормальную к береговой черте составляющую. На крайней северо-восточной прибрежной станции (ст.9), расположенной в самом узком месте косы, вектор скорости течения был ориентирован от берега.

Отметим, на наш взгляд, интересную особенность вертикальной структуры системы течений в исследуемом районе: в большинстве случаев (на 8-ми станций из 12-ти) скорость течения у дна была выше скорости течения на поверхности моря. Эта закономерность также наблюдалась на всех станциях, расположенных в районе бара (рис.1, б).

Вдольбереговое течение, струя которого была зафиксирована инструментально, на поверхности моря имело собственные визуальные признаки. Его воды отличались повышенной прозрачностью и собственной цветностью, а ближний к берегу край на поверхности моря хорошо различался визуально по вытянутым вдоль берега полосам пены.



Продолжение рис.2.

*Температура воды.* Толща вод была хорошо перемешанной и, практически, термически однородной. Абсолютный диапазон изменения температуры воды (3,48 – 3,53 °С) оказался в пределах точности измерения опрокидывающимся ртутным глубоководным термометром.

*Соленость* изменялась в интервале от 7,48 до 7,82 ‰. Она увеличивалась с глубиной. Распределение данной характеристики как у поверхности, так и у дна свидетельствует о присутствии в мористой области полигона хорошо выраженной струи распресненных вод (рис.2, а, б).

*Растворенное органическое вещество.* Как на поверхности моря, так и у дна максимальные значения содержания растворенного органического вещества 15 – 21 мг/л наблюдались в открытых водах в распресненных струях вдольберегового течения (рис.2, в, г). То есть в системе прибрежной циркуляции в область Бердянской косы из акватории Бердянского залива поступали воды с высокой концентрацией растворенной органики.

Для незагрязненных вод Азовского моря существует тесная обратная корреляционная связь между соленостью и содержанием растворенного органического вещества [5]. Это на качественном уровне подтверждается результатом анализируемого эксперимента (рис.2, а – г). Также рассматриваемые данные указывают на преимущественно терригенное (связанное с речным стоком) происхождение растворенного органического вещества в прибрежных водах Азовского моря.

*Концентрация общего взвешенного вещества.* Как на поверхности моря, так и у дна отмечалась значительная концентрация общей взвеси. На поверхности моря она изменялась от 9,5 до 17 мг/л при максимуме непосредственно у берега у южной оконечности косы, что, по-видимому, связано с процессом волнового обрушения. Наименьшие значения данной характеристики 9,5 – 10 мг/л зафиксированы в мористой части полигона. То есть воды, переносимые вдольбереговым течением, отличались минимальной концентрацией общего взвешенного вещества (рис.2, д).

В придонном слое концентрация общего взвешенного вещества была примерно такой же, как и в верхнем слое вод 10 – 16,5 мг/л, но максимум 15 – 16,5 мг/л располагался как в зоне волнового обрушения, так и над баром (рис.2, е). Это свидетельствует о том, что на рассматриваемой акватории существуют собственные источники взвеси, возможно, связанные с процессами взмучивания под влиянием волнения и течений непосредственно в прибрежной зоне и над баром.

*Нефтепродукты.* Концентрация растворенных в воде нефтепродуктов изменялась от 2,1 до 1,1 отн. ед. Локальные максимумы их содержания располагались непосредственно у берега, в пляжной зоне, и были зафиксированы на ст.1 и 8. Судя по форме небольших пятен нефтяного загрязнения, его источники находились непосредственно на косе и были обусловлены сточными водами расположенных здесь двух пансионатов. Воды, переносимые струей вдольберегового течения, были практически чистыми. По содержанию растворенных нефтепродуктов их качество соответствует качеству вод открытой части Черного моря (рис.2, ж, з).

*Мутность и потоки взвеси.* На рис.3 на каждом из четырех сечений, расположенных параллельно береговой линии в направлении от берега в

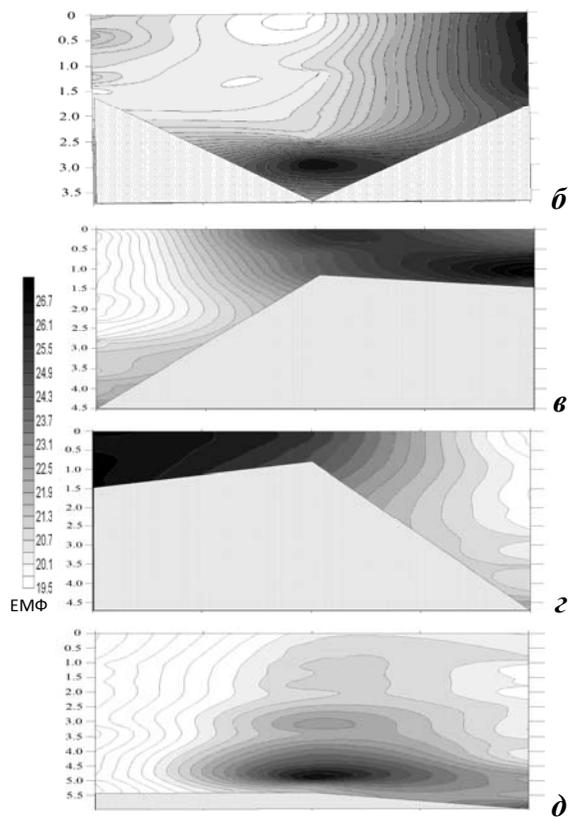
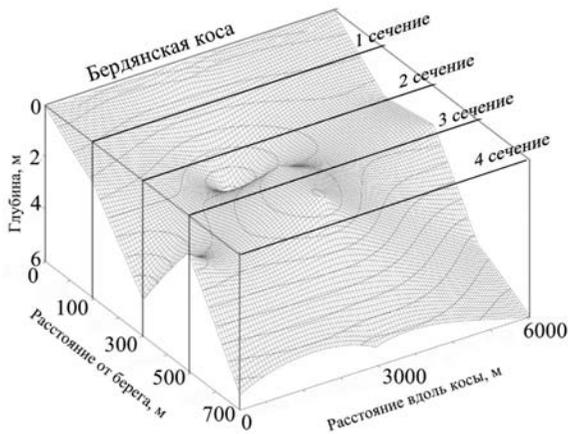


Рис. 3. Рельеф дна (а) и распределение мутности (ЕМФ) в четырех параллельных берегу сечениях (б, в, г, д).

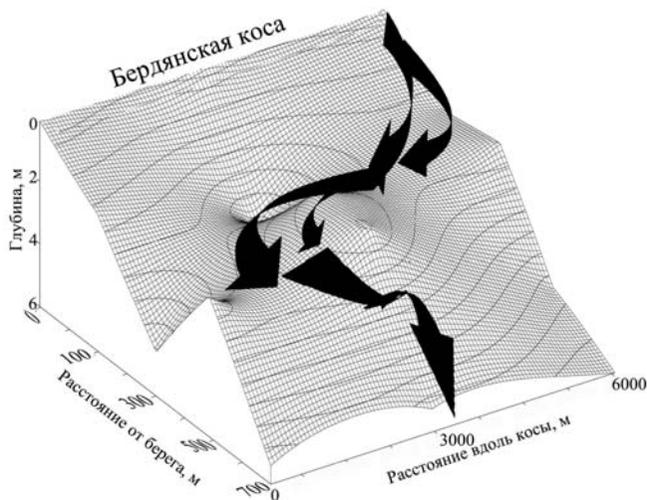
стрелками нанесена траектория потоков взвешенного вещества.

Абсолютный максимум мутности 27 ЕМФ (источник суммарной взвеси) располагался в области самого узкого и активно размываемого участка косы (ст.9). Здесь же вектор течения был направлен от берега (рис.1, б). От источ-

мористую область полигона, показано распределение мутности вод, позволяющее судить о трехмерной структуре ее поля. Видно, что поле исследуемой оптической величины отличается существенной неоднородностью с ярко выраженными отдельными ядрами, где значение мутности достигает 27, что на 5 – 10 ЕМФ выше окружающего фона.

**а** Эта структурная особенность дает основание отождествить положение ядер в поле мутности со стрежнем мутьевого потока (потока суммарного взвешенного вещества), что также следует из элементарных логических соображений: поток с максимальной концентрацией взвеси должен проявляться в поле мутности в виде локального максимума. То есть линия, проходящая через последовательно расположенные ядра мутности, соответствует стрежню и траектории потока взвешенного вещества. Очевидно, что поток взвеси направлен от ядер с большей мутностью к ядрам с меньшей мутностью. Источник взвеси соответствует абсолютному максимуму мутности.

**б** На рис.4 на объемной схеме донного рельефа по положению максимума мутности для каждого сечения (рис.3, б – д) на основе высказанных выше соображений



Р и с . 4 . Траектория потока взвеси на фоне донного рельефа.

ника поток с максимальным содержанием взвешенного вещества отходил в мористую сторону на юг, юго-запад и далее по циклонической траектории обтекал локальное поднятие дна, находившееся в области бара. Затем по его мористому склону, заглубляясь, распространялся в открытое море.

Выявленная закономерность движения взвешенного вещества в совокупности с кинематическими и морфометрическими особенностями рассматриваемой акватории позволяет на качественном уровне пояснить один из механизмов размыва Бердянской косы. Возможно, что в результате деформации дна, возникшей после штормового нагона, на рассматриваемой акватории изменилась локальная система течений. В частности, при взаимодействии вдольберегового течения с вновь образовавшимся в области бара поднятием дна сформировалась квазистационарная вихревая ячейка, способствовавшая отклонению вдольберегового потока взвеси в мористую сторону, ее оттоку от берега и размыву косы.

**Заключение.** В результате анализа данных океанографического эксперимента, реализованного 8 декабря 2007 г. у восточного побережья Бердянской косы, выявлено следующее.

Основной фактор, определявший динамику вод на рассмотренной акватории, представлен вдольбереговым течением юго-западного направления. В системе вдольберегового течения в прибрежную область у Бердянской косы поступали менее соленые на общем фоне воды. Они также имели пониженное содержание суммарной взвеси и минимальную концентрацию нефтепродуктов, но отличались высокими значениями концентрации растворенного органического вещества.

Подтверждено наличие обратной связи между соленостью и содержанием растворенного органического вещества и терригенное происхождение этого вещества в прибрежных водах Азовского моря.

Пляжная полоса характеризовалась максимальным (более чем в два раза превосходящим норму) содержанием нефтепродуктов. Локальные источники

нефтяного загрязнения пляжа располагались непосредственно на берегу Бердянской косы и были обусловлены функционированием двух пансионатов.

На основе анализа структуры поля мутности выявлен один из факторов размыва береговой линии и определена траектория потока общего взвешенного вещества. Показано, что оттоку взвеси из прибрежной области в открытое море способствовало квазистационарное топографическое вихревое образование. Последнее могло быть следствием взаимодействия струи вдольберегового течения с новообразованным после штормового нагона локальным поднятия дна.

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме № 0827-2014-0010 «Комплексные междисциплинарные исследования океанологических процессов, определяющих функционирование и эволюцию экосистем Черного и Азовского морей на основе современных методов контроля состояния морской среды и гридтехнологий».

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Chepyzhenko A.I., Halturin V.I.* Laboratory and flow-through optical spectral probes to measure water quality and content // *Ocean Remote Sensing and Applications* / Ed. by Robert J. Frouin, Yell Yuan, Hiroshi Kawamura // *Proc. SPIE* (24-26 October 2002, Hangzhou, China).– 2003.– v.4892.– P.482-488.
2. *Clark D.K.* MODIS. Algorithm Theoretical Basis Document, Bio-Optical Algorithms.– Washington D.C.: National Oceanic and Atmospheric Administration, National Environmental Satellite Service.– 20233, Version 1.2.
3. *Fargion G.S., Mueller J.L.* Ocean Optics Protocols For Satellite Ocean Color Sensor Validation.– San Diego, California, NASA, Goddard Space Flight Space Center, Greenbelt, Maryland 20771.– August 2000.
4. <http://ecodevice.com.ua/ecodevice-catalogue/multiturbidimeter-kondor>
5. *Ломакин П.Д., Чепыженко А.И., Чепыженко А.А.* Поле растворенного органического вещества в Азовском море и Керченском проливе на базе оптических наблюдений // *Морской гидрофизический журнал*.– 2016.– № 5.– С.76-88.

Материал поступил в редакцию 12.07.2017 г.  
После доработки 29.09.2017 г.

P.D.Lomakin, A.I.Chepyzhenko, A.A.Chepyzhenko

#### HYDROPHYSICAL CONDITIONS AND WATER POLLUTION IN BERDYANSKAYA FORELAND REGION (THE SEA OF AZOV) IN DECEMBER 2007

Based on oceanographic expeditionary research data, conducted on December 8, 2007, the features of hydrophysical conditions were considered. The Sea of Azov waters' pollution degree in the region of Berdyanskaya foreland was estimated. The total suspended matter motion regularities and the foreland erosion mechanisms were revealed. It is shown that the system of alongshore currents in interaction with the bottom heterogeneities in the bar region, has promoted Berdyanskaya foreland' eastern section erosion and suspended matter removal into the open sea.

KEY WORDS: salinity, currents, total suspended matter, dissolved organic matter, oil, the Sea of Azov