

**РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ  
СТРУКТУРЫ ПОЛЯ СУММАРНОГО ВЗВЕШЕННОГО ВЕЩЕСТВА  
НА УЧАСТКАХ АЗОВО-ЧЕРНОМОРСКОГО ПОБЕРЕЖЬЯ УКРАИНЫ  
В ПРИЛОЖЕНИИ К ЗАДАЧАМ МОРСКОЙ ГЕОЛОГИИ И ЭКОЛОГИИ**

© П.Д. Ломакин, А.И. Чепыженко, А.А. Чепыженко, 2011

*Морской гидрофизический институт НАН Украины, Севастополь, Украина*

The paper shows the possibility of operative survey of a 3-dimensional field concentration of the TSM in water with the help of sounder turbidimeter. An analysis of the data allows to value the kinematic particularities of suspension currents, reveal the sources of the TSM distribution, find out the areas of coastal and bottom erosion, as well as the zones of TSM accumulation. Presented in the article are the results of naval research that demonstrate these characteristics for different areas of the Azov and Black Sea coasts. The paper gives expediency and efficiency of the information use of a 3-dimensional field of the TSM to solve a wide range of applied problems including marine geology and ecology.

**Keywords:** the Azov and Black Sea coasts, total suspended matter (TSM), kinematic particularities of suspension currents, ways of the TSM distribution.

**Введение.** Решение задач морской геологии и гидротехнического строительства, в том числе защиты берегов, проектирования портов и судоходных каналов, освоения месторождений нефти и газа на шельфе, связано с исследованием на участках морской акватории структуры и изменчивости поля суммарного взвешенного вещества.

Суммарное взвешенное в водной толще вещество – важнейший параметр состояния водной среды. Поле этой не традиционной для физической океанографии приведенной характеристики до недавнего времени, как правило, исследовалось морскими геологами. Определение концентрации общей взвеси в пробах воды классическими методами (например, методом выпаривания пробы воды и последующего взвешивания сухого остатка [1]) – достаточно трудоемкий и дорогостоящий анализ. По-видимому, этим можно объяснить недостаток и полное отсутствие соответствующей информации в базах океанологических данных, относящихся к крупным регионам Мирового океана, его отдельным морям и, в частности, Азово-Черноморскому бассейну. К тому же, сведения о поле взвеси, получаемые на основе батометрических серий, ввиду слабой дискретности дают приближенное представление о его структуре.

Извлечение массовой детальной информации о трехмерном поле суммарного взвешенного в морской среде вещества стало возможным благодаря разработке зондовой аппаратуры. Зонды-мутномеры, впервые появившиеся в США около 20 лет назад [2–4], сейчас активно применяются за рубежом для исследования как океанских и морских акваторий, так и пресных водоемов.

Аналогичный прибор 7 лет назад был создан в Морском гидрофизическом институте (МГИ) НАН Украины. Опыт его эксплуатации на различных участках в прибрежных водах Украины позволил получить детальную информацию, на основе которой были выявлены ранее неизвестные и практически важные закономерности структуры и изменчивости поля этого параметра водной среды.

Один из наиболее значимых результатов экспериментальных исследований, которые проводятся нами с помощью зонда-мутномера, заключается в возможности оперативного извлечения информации о трехмерном поле концентрации суммарного взвешенного в воде вещества с высоким пространственным разрешением. Последующий ее анализ дал возможность получить представление об элементах пространственной структуры этой океанологической характеристики (квазиоднородные слои, прослойки максимального вертикального градиента, линзы с экстремальным содержанием взвеси, фронтальные разделы); оценить кинематические особенности мутьевых потоков; выявить источники и пути распространения взвешенного вещества, участки размыва берегов и дна, а также области аккумуляции взвеси. В совокупности все это позволяет выйти на возможные механизмы, вызывающие абразию и осадконакопление на интересующих морских акваториях.

Цель настоящей статьи – продемонстрировать отмеченные возможности на конкретных примерах; показать результаты экспериментальных исследований структуры и изменчивости поля сум-

марного взвешенного вещества на участках Азово-Черноморского побережья Украины, которые были проведены нами в интересах решения задач морской геологии, гидротехнического строительства и экологии.

**Исходные данные и методы исследования.** В качестве исходных сведений использованы массивы данных о содержании суммарного взвешенного в водной толще вещества, накопленные нами в ходе выполнения океанологических съемок на различных участках Азово-Черноморского побережья Украины. Это съемки вдоль мористой части Бердянской косы (Азовское море), в районах о-ва Тузла (Керченский пролив) и Карадагского заповедника (восточное побережье Крыма). Диапазон исследованных глубин от 0,5 до 50 м, шаг по глубине 0,1 м, время одного зондирования до глубины 50 м около 1 мин, время реализации анализируемых съемок 3–7 ч.

Каждая съемка проводилась с помощью оптического зонда-мутномера. Отметим метрологическую особенность прибора: он может быть отградуированным как в объемно-весовых единицах взвеси (мг/л), так и в оптических единицах мутности (ЕМФ), которые численно соотносятся, как 1/0,66 [5]. Поскольку концентрация взвеси и мутность вод связаны прямой зависимостью, то структура полей данных параметров среды качественно аналогична. Поэтому в тексте настоящей статьи указанные величины иногда отождествляются. Детальные сведения о зонде можно найти на сайте [6].

Опыт интерпретации структурных особенностей поля взвешенного вещества позволил нам выявить характерные признаки, присущие мутьевым потокам и зонам аккумуляции взвеси.

Мутьевой поток в трехмерном поле этой характеристики проявляется в виде вытянутого образования (его поперечный линейный масштаб существенно меньше продольного) с повышенным на общем фоне содержанием взвешенного вещества. В секущих поток плоскостях его стрежень обнаруживается в виде ядер с максимальной концентрацией взвеси. Такая структурная особенность дает основание отождествить положение ядер в поле мутности (взвеси) со стрежнем мутьевого потока. Другими словами, линия, проходящая через последовательно расположенные ядра мутности, соответствует стержню и траектории потока взвешенного вещества. Очевидно, что поток взвеси направлен от ядер с высокой мутностью к ядрам с меньшей мутностью. Источник взвеси на рассматриваемом участке акватории соответствует абсолютному максимуму мутности.

Устойчивые во времени структурные образования, которые в трехмерном поле взвеси (мутности) имеют вид облака с максимумом концент-

рации в придонном слое, соответствуют областям ее аккумуляции.

По сути данный метод представляет собой прямой аналог известного и широко распространенного в классической океанологии метода ядра, используемого для оценки кинематических свойств течений по косвенным признакам — структурным особенностям термохалинного поля и полей гидрохимических элементов.

**Обсуждение результатов. Район Бердянской косы.** Вследствие жестокого шторма 11 ноября 2007 г., сопровождавшегося мощным нагоном и катастрофическим подъемом уровня моря, в районе Бердянской косы была размыва значительная часть пляжной зоны. Безвозвратно утеряны отдельные участки пляжа протяженностью до 100–150 м. Оздоровительные учреждения частично или полностью лишились пляжной полосы. Были подмыты, повреждены и разрушены многочисленные здания.

Перечисленные факты стали следствием прямого разрушительного действия отмеченного особо опасного природного явления.

В течение нескольких месяцев после шторма, когда установились типичные для Азовского моря погодные условия, ширина пляжной полосы на отдельных участках косы продолжала сокращаться. Наиболее интенсивная эрозия наблюдалась в самой узкой области косы, где пляж сузился до нескольких десятков метров.

С целью выявления механизмов, способствовавших дальнейшему размыву пляжа у восточного побережья Бердянской косы после жестокого шторма 11 ноября 2007 г., здесь 8 декабря 2007 г. нами были проведены комплексные гидрофизические исследования, включившие съемку зондом-мутномером. По ее результатам в прибрежной зоне, у самого узкого места косы, был выявлен достаточно масштабный поперечный мутьевой поток, ставший вторичной причиной размыва этого участка косы.

Океанографическая съемка, сопровождавшаяся прецизионным промером дна и состоявшая из четырех параллельных берегу разрезов, была выполнена на полигоне размером 700 × 6000 м. Здесь, примерно в центральной части исследуемой акватории, в области бара, нами было обнаружено небольшое поднятие дна, которое, как выяснилось, сформировалось после штормового нагона.

На рис. 1 для каждого разреза в направлении от берега в мористую область полигона показано распределение суммарной взвеси, позволяющее судить о трехмерной структуре ее поля. Видно, что поле исследуемой гидрофизической величины отличалось существенной неоднородностью с ярко выраженными отдельными ядрами, где значение его содержания достигало 23–27 мг/л, что на 5–10 мг/л выше окружающего фона.

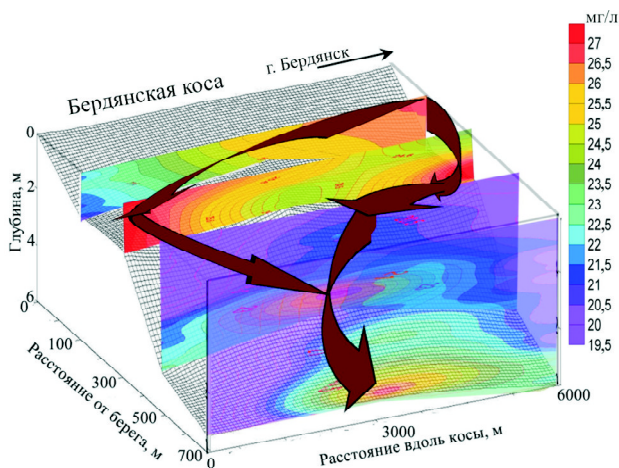


Рис. 1. Распределение взвеси (мг/л) на параллельных берегу разрезах на фоне рельефа дна и траектория мутьевого потока у мористого побережья Бердянской косы в декабре 2007 г.

Идентифицировав стрежень мутьевого потока с максимумом концентрации взвеси, мы попытались определить его траекторию. На рис. 1 на объемной схеме донного рельефа по положению локальных максимумов мутности для каждого разреза на основе изложенных выше соображений стрелками нанесена траектория потоков взвешенного вещества. Видно, что абсолютный максимум мутности 27,6 мг/л (источник суммарной взвеси) располагался у берега, в области самого узкого и активно размываемого участка косы. Отметим, что в этой же точке нами инструментально было зафиксировано направленное от берега ( $157^\circ$ ) течение скоростью 3–5 см/с, тогда как на остальных, расположенных непосредственно у берега станциях течение характеризовалось отчетливо выраженной направленной к береговой черте составляющей. От источника поток суммарного взвешенного вещества в виде двух ветвей отходил в мористую сторону на юг, юго-запад и далее по циклонической траектории обтекал образовавшееся вследствие шторма локальное поднятие дна. Затем по его мористому склону, заглубляясь, мутьевой поток распространялся в открытое море.

Выявленная закономерность движения взвешенного вещества в совокупности с кинематическими и морфометрическими особенностями рассматриваемой акватории позволяет составить цепочку причинно-следственных связей, на качественном уровне поясняющую вторичный природный механизм размыва Бердянской косы. Штормовой нагон вызвал деформацию донного рельефа в районе косы. В результате взаимодействия вдольберегового течения с образовавшейся неоднородностью дна в области бара возникло локальное вихревое образование, способствовавшее формированию поперечной составляющей мутьевых потоков и выносу взвешенного вещества из пляжной зоны.

**Район о-ва Тузла.** После строительства тузлинской дамбы стала активно размываться восточная оконечность острова, тогда как в его западной части в последние годы наблюдается процесс аккумуляции взвеси и ее осаждения в донные отложения [7].

Ниже, в качестве примера, рассмотрены результаты лишь одной из серии съемок, проведенных МГИ НАН Украины в районе о-ва Тузла, которая иллюстрирует возможность использования зонда-мутномера для выявления реально существующей многослойной структуры мутьевых потоков с хорошим (от 1 м до нескольких дециметров) разрешением по глубине, а также механизмов и участков абразии и осадконакопления.

Анализируемая съемка была проведена вокруг о-ва Тузла 25 апреля 2009 г. по детальной и достаточно густой (размер элементарной ячейки  $50 \times 200$  м) сетке станций в диапазоне глубин 1–6 м с борта маломерного судна. Во время съемки и в течение предшествовавшей ей недели над проливом преобладали умеренные северо-восточные ветры. В северной части пролива и в Таманском заливе наблюдались воды с высоким содержанием взвеси. Южнее о-ва Тузла преобладали черноморские воды с минимальной концентрацией суммарного взвешенного в воде вещества. На рис. 2 а, в видно, что с юга и севера от острова находились воды с качественно различными свойствами. Их мутность, например, различалась в 15 раз. Это указывает на существенную изолированность Таманского залива от южной части Керченского пролива и на ограниченность водообмена через узкость между о-вом Тузла и дамбой. Очевидна негативная роль дамбы, как механического препятствия для вентилирования акватории Таманского залива.

На рис. 2, а, б о-в Тузла развернут своей восточной оконечностью по нормали к их плоскости. На рис. 2, а показано распределение взвеси на разрезах, расположенных перпендикулярно к южному и северному берегам острова, на основе которых построены траектории мутьевых потоков, изображенные на рис. 2, б.

Видна трехслойная структура мутьевых потоков вдоль восточного побережья острова. Их вертикальный масштаб — от нескольких дециметров до 1 м. В верхнем слое черноморские воды с минимальным содержанием суммарного взвешенного вещества (синяя стрелка) по циклонической траектории обтекали восточную часть острова. В Таманском заливе вдоль северного склона острова эта струя с минимальной концентрацией взвеси опускалась на дно и далее, следуя к проходу между косой Чушка и о-вом Тузла, вновь выходила на поверхность (рис. 2, б). Отток взвеси от восточной оконечности острова, направленный в Таманский залив, в системе мутьевых потоков

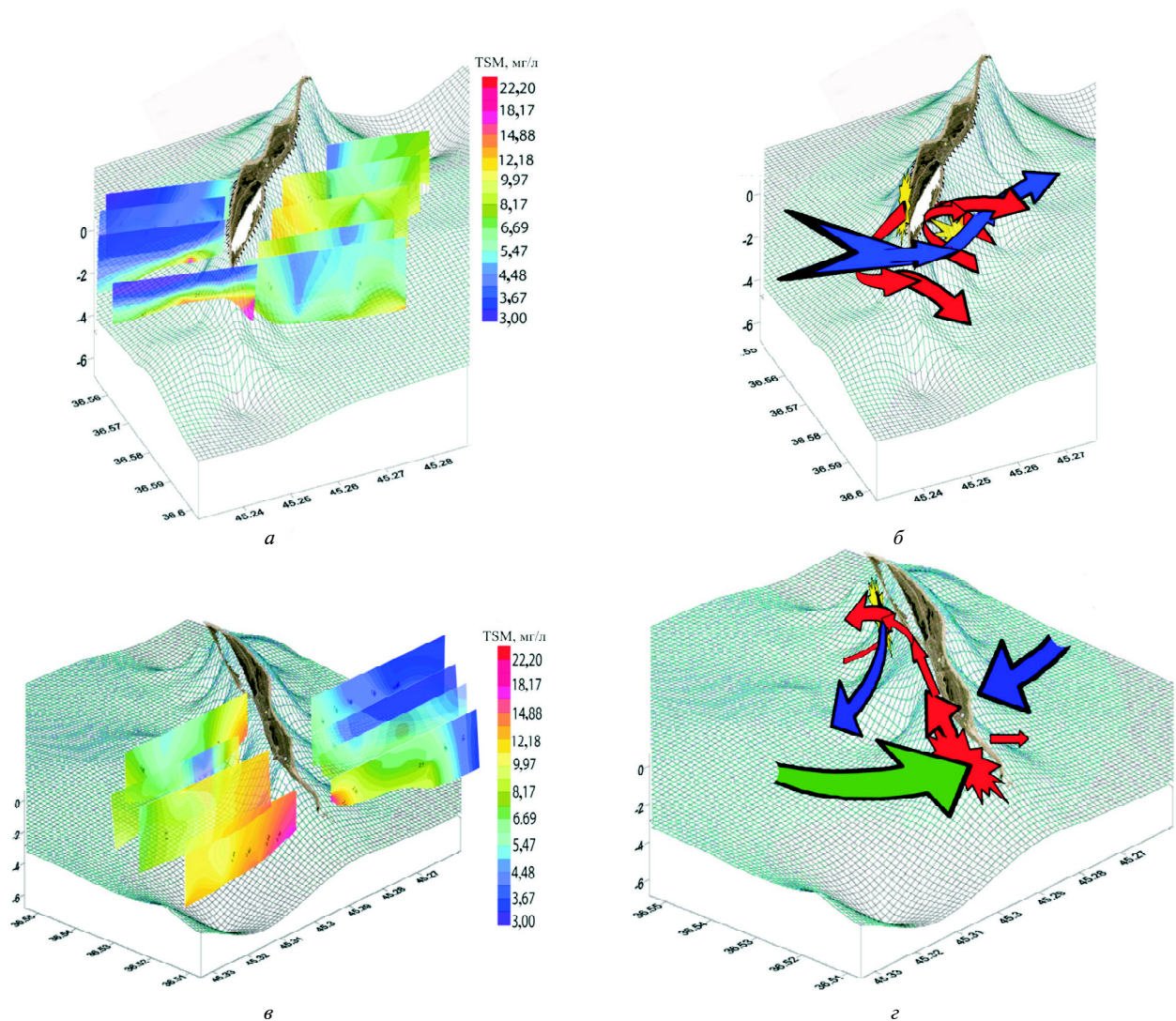


Рис. 2. Распределение взвеси (мг/л) в апреле 2009 г.: а, в — на нормально ориентированных к берегу разрезах; схемы мутьевых потоков: б — у восточной оконечности о-ва Тузла; г — у его западной оконечности

происходил как в срединном (стрелки желтого цвета), так и в придонном (красные стрелки) слое (рис. 2, б). Таким образом, в данной ситуации преобладали процессы, вызывавшие эрозию берега и подводного склона восточной оконечности о-ва Тузла и сопровождавшиеся выносом взвешенного вещества в Таманский залив.

Выявленный нами и рассмотренный выше эффект подтверждается результатом геологических экспериментальных исследований [8], проведенных российскими авторами. Согласно цитируемой работе, при северо-восточном ветре, как и по нашим данным, происходит размыв восточной оконечности острова. Образовавшаяся при этом взвесь аккумулируется у западных и северо-западных участков дамбы. Основным источником поступления осадочного материала в береговую зону дамбы, помимо песков из береговых обрывов и ракуши, служит материал размыва о-ва Тузла.

У западной оконечности острова (рис. 2, в, г; он развернут своей западной оконечностью по нормали к плоскости рисунка) наблюдалась конвергенция мутьевых потоков, которые поступали

сюда со стороны Черного и Азовского морей. В результате непосредственно у западного края острова у дна сформировалась малоградиентная структура с повышенным содержанием взвешенного вещества (на рис. 2, г изображена красным цветом). Здесь преобладали процессы осадконакопления.

Приведенные выше примеры демонстрируют возможность обсуждаемого метода в плане разрешения детальной структуры мутьевых потоков, что чрезвычайно важно в приложении к задачам защиты берегов и гидротехнического строительства.

Далее проиллюстрирована целесообразность его использования в экологии.

#### **Район Карадагского природного заповедника.**

В ходе четырех съемок, выполненных нами в составе экспедиций Института биологии южных морей НАН Украины в районе заповедника в течение 2007–2009 гг., были зафиксированы два обширных облака взвеси. Они располагались в Коктебельской и Карадагской бухтах. Концентрация суммарного взвешенного вещества на участках указанных бухт во всей толще вод была чрез-

вычайно высокой, причем она увеличивалась с глубиной. Непосредственно у дна в этих бухтах концентрация взвешенного вещества в 2007 г. составляла соответственно 11,2 и 40,6 мг/л, что в десятки и сотни раз выше природного фона [9].

Была отмечена также устойчивая тенденция к ухудшению экологической ситуации, поскольку от съемки к съемке в прибрежной области заповедной акватории содержание взвеси в толще вод постоянно увеличивалось на 2–15 %, наиболее интенсивно – в придонном слое обеих бухт. Так, к лету 2009 г. в Карадагской бухте концентрация суммарного взвешенного в воде вещества у дна достигла 45,1, а в Коктебельской – 20,2 мг/л (рис. 3).

Это явление можно объяснить загрязнением рассматриваемых бухт сточными водами, которое фиксировалось ранее в узкой прибрежной полосе гидрохимическими и гидробиологическими исследованиями, ведущимися здесь в течение последних десяти лет сотрудниками Карадагского заповедника. Согласно мнению [10], основная причина загрязнения вод в районе Карадагского заповедника обусловлена отсутствием современных очистных сооружений в поселках Коктебель (бывш. Планерское) и Курортное.

Судя по структуре поля взвешенного вещества, обе отмеченные выше бухты представляют собой основные места его аккумуляции. По-видимому, здесь же накапливаются всевозможные загрязнители, содержащиеся в сточных водах. Зафиксированная нами высокая и постоянно нарастающая концентрация токсичной взвеси может привести к заилению донных биоценозов с соответствующими негативными последствиями.

В последние годы на рассматриваемой заповедной акватории резко ухудшилась экологиче-

ская обстановка, что сопровождается массовой гибелью бентосных организмов.

**Закключение.** Опыт эксплуатации оптического зонда-мутномера на различных участках Азово-Черноморского побережья Украины и анализ накопленной информации позволяет утверждать следующее.

Зонд-мутномер – эффективное средство, дающее возможность в короткие интервалы времени извлекать детальную информацию о трехмерном поле концентрации суммарного взвешенного в воде вещества. Ее анализ позволяет получить представление об элементах пространственной структуры этой океанологической характеристики; оценить кинематические особенности мутьевых потоков; выявить источники и пути распространения взвешенного вещества, участки размыва берегов и дна, области аккумуляции взвеси, что в итоге дает возможность выйти на механизмы, вызывающие абразию и осадконакопление на интересующих морских акваториях. Результаты подобных исследований могут найти успешное применение в задачах морской геологии, гидротехнического строительства, экологии и др.

По результатам съемок, реализованных нами с использованием зонда-мутномера, удалось выявить возможные причины и факторы, вызвавшие негативные явления в прибрежных водах Украины. В частности, размыв Бердянской косы, продолжавшийся после штормового нагона в ноябре 2007 г., был связан с оттоком взвеси в системе образовавшегося поперечного мутьевого потока. Процессы абразии и накопления взвеси соответственно у восточной и западной оконечностей о-ва Тузла, наблюдаемые после строительства дамбы, обусловлены особой кинематикой локальных мутьевых потоков. Один из значимых

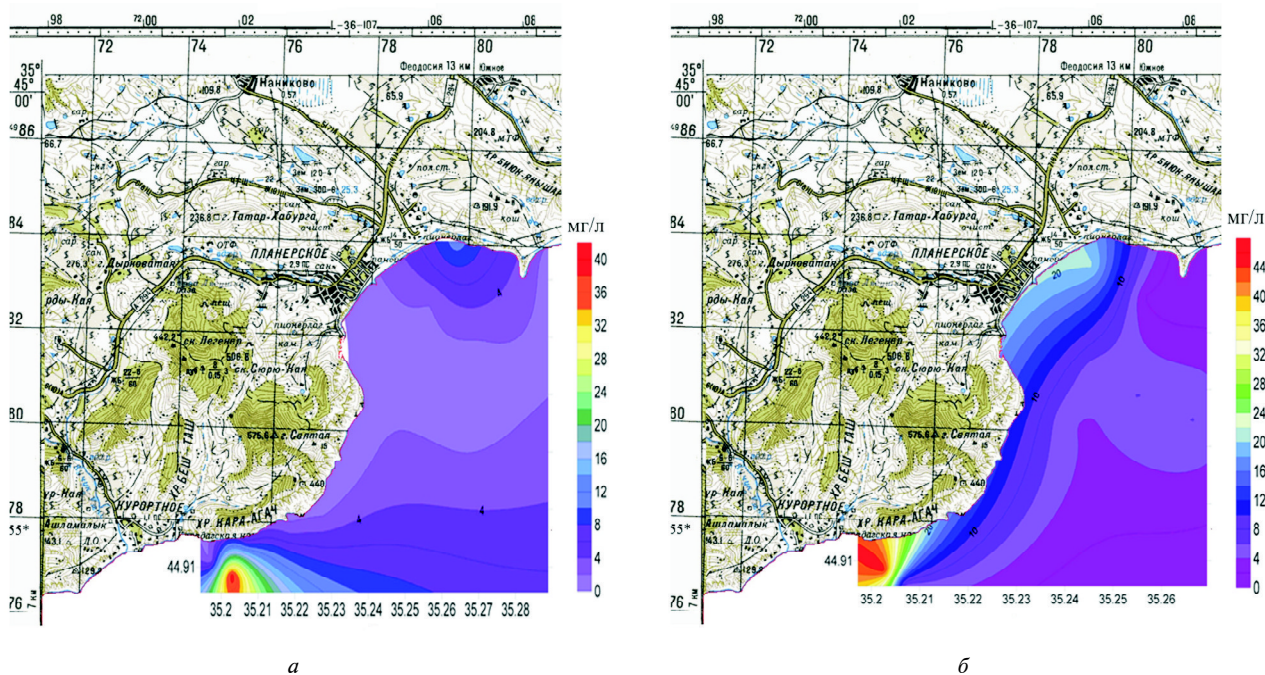


Рис. 3. Распределение взвеси (мг/л) у дна в районе Карадагского заповедника в мае 2007 г. (а) и в июле 2009 г. (б)

факторов, вызвавших резкое ухудшение экологической обстановки в районе Карадагского заповедника, связан с накопившейся в придонном слое Карадагской и Коктебельской бухт избыточной токсичной взвесью, поступающей со сточными водами расположенных здесь населенных пунктов.

1. *Лисицын А.П.* Методы сбора и исследования взвеси для геологических целей // Тр. ИОАН СССР. – 1956. – 19. – С. 262–287.
2. <http://www.referenceforbusiness.com/industries/Analyzing-Controlling-Instruments/Laboratory-Analytical-Instruments.html>
3. <http://www.freepatentsonline.com/3775013.html>
4. [http://www.dmoz.org/Science/Environment/Environmental\\_Monitoring/Products\\_and\\_Services/Water](http://www.dmoz.org/Science/Environment/Environmental_Monitoring/Products_and_Services/Water)
5. *Ломакин П.Д., Спиридонова Е.О., Чепыженко А.И., Чепыженко А.А.* Антропогенные и природные источники взвешенного вещества в водах Керченского пролива // Мор. экол. журн. – 2008. – 7, № 4. – С. 51–59.
6. <http://www.ecodevice.narod.ru/turbidimeter/turbidimeter.htm>
7. *Степаняк Ю.Д., Башкирцева Е.В.* Морфология и литодинамика о. Коса Тузла по данным дистанционных наблюдений // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексные исследования ресурсов шельфа. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2009. – Вып. 20. – С.100–107.
8. [http://student.km.ru/ref\\_show\\_frame.asp?id=159FACEDD4BA46A7AEC5D9F416DEE764](http://student.km.ru/ref_show_frame.asp?id=159FACEDD4BA46A7AEC5D9F416DEE764)
9. *Ломакин П.Д., Чепыженко А.И., Чепыженко А.А.* Характеристика загрязнения прибрежных вод у Карадагского заповедника в мае 2007 года по данным оптических наблюдений // Карадаг-2009: Сб. науч. тр. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2009. – С. 439–445.
10. *Смирнова Ю.Д.* Результаты многолетних исследований узкой прибрежной зоны акватории Карадагского природного заповедника (гидрохимия, гидробиология) // Карадаг-2009: Сб. науч. тр. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2009. – С. 462–473.

*Поступила в редакцию 26.11.2010 г.*

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

#### **РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ СТРУКТУРЫ ПОЛЯ СУММАРНОГО ВЗВЕШЕННОГО ВЕЩЕСТВА НА УЧАСТКАХ АЗОВО-ЧЕРНОМОРСКОГО ПОБЕРЕЖЬЯ УКРАИНЫ В ПРИЛОЖЕНИИ К ЗАДАЧАМ МОРСКОЙ ГЕОЛОГИИ И ЭКОЛОГИИ**

Показана возможность оперативного набора массовой информации о трехмерном поле концентрации суммарного взвешенного в воде вещества с помощью оптического зонда-мутномера, анализ которой позволяет оценить кинематические особенности мутьевых потоков, выявить источники и пути распространения взвешенного вещества, области размыва берегов и дна, места аккумуляции взвеси. Кратко представлены результаты морских экспериментальных исследований, иллюстрирующие данные свойства для различных участков Азово-Черноморского побережья Украины. Продемонстрирована целесообразность и эффективность использования информации о трехмерном поле взвеси при решении широкого круга прикладных задач, в том числе морской геологии и экологии.

**Ключевые слова:** Азово-Черноморское побережье Украины, суммарное взвешенное вещество, кинематические особенности мутьевых потоков, пути распространения взвешенного вещества.

*П.Д. Ломакін, О.І. Чепиженко, Г.О. Чепиженко*

#### **РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ СТРУКТУРИ ПОЛЯ СУМАРНОЇ ЗВАЖЕНОЇ РЕЧОВИНИ НА ДІЛЯНКАХ АЗОВО-ЧОРНОМОРСЬКОГО УЗБЕРЕЖЖЯ УКРАЇНИ В ДОДАТКУ ДО ЗАВДАНЬ МОРСЬКОЇ ГЕОЛОГІЇ ТА ЕКОЛОГІЇ**

Показано можливість оперативного набору масової інформації про тривимірне поле концентрації сумарної зваженої у воді речовини за допомогою оптичного зонда-мутноміра, аналіз якої дає змогу оцінити кінематичні особливості мулових потоків, виявити джерела та шляхи поширення зваженої речовини, зони розмивання берегів і дна, місця акумуляції зваженої речовини. Коротко наведено результати морських експериментальних досліджень, що ілюструють зазначені властивості для різних ділянок Азово-Чорноморського узбережжя України. Продемонстровано доцільність та ефективність використання інформації про тривимірне поле зваженої речовини для вирішення широкого кола прикладних завдань, у тому числі завдань морської геології та екології.

**Ключові слова:** Азово-Чорноморське узбережжя України, зважена речовина, кінематичні особливості мулових потоків, шляхи поширення зваженої речовини.