

В.З. Дыкман, О.И. Ефремов, Е.В. Маньковская

Натурные исследования движения наносов в прибрежной зоне моря

В статье представлены результаты измерений с помощью аппаратного комплекса «Донная станция» в береговой зоне шельфа Крыма около Евпатории и у юго-восточной оконечности о. Коса Тузла. При одинаковых по силе ветрах в этих районах интенсивность волн и турбулентности в прибрежной зоне около Евпатории намного больше, соответственно и потоки взвешенных осадков здесь более интенсивные. Полученные данные предназначены для корректировки кинетической модели расчета характеристик поля взвешенных осадков на мелководье.

Введение. Верхняя, или береговая часть шельфа отличается тем, что на нее воздействуют волнения любой силы. Динамические процессы, характерные для глубокого моря, в мелководной области протекают значительно интенсивнее и более доступны для наблюдения. Одной из основных проблем является изучение закономерностей переноса песчаных осадков на мелководье под действием волн. Процессы взаимодействия жидкой и твердой фаз очень сложны, до настоящего времени для них не найдено строгого математического описания, и поэтому основным методом исследования является построение различных физических моделей явления.

Применяемые модели описания потоков жидкости, содержащей взвешенные твердые частицы, можно условно разделить на гидродинамические и кинетические. В гидродинамических моделях взвесь рассматривается как цельный объект, характеризуемый средними по гранулометрическому составу параметрами концентрации и скорости осаждения. Такие модели хорошо развиты и успешно применяются. В подтверждение можно привести одну из наиболее значимых работ [1], в которой на основе большого экспериментального материала, в сочетании с анализом имеющихся теоретических представлений, разработаны конкретные расчетные схемы и рекомендации прогноза динамики наносов в прибрежной зоне моря. Практическое применение разработанной модели дало конкретные положительные результаты, о чем свидетельствует, например, статья [2].

Вместе с тем некоторые важные аспекты движения наносов, в частности распределения концентрации взвешенного твердого материала по глубине, и в настоящее время считаются недостаточно изученными. В работе [3] результаты расчетов вертикального распределения концентрации взвеси по различным гидродинамическим моделям сравниваются с экспериментальными данными, полученными с помощью акустического профиломера. В этой статье рассматриваются три модели: диффузионная, в которой вертикальный поток взвеси рассчитывается как произведение градиента ее концентрации и коэффициента турбулентной вязкости; конвективная, в которой вертикальный перенос частиц осуществляется отдельными вихрями, обеспечивающими неко-

© В.З. Дыкман, О.И. Ефремов, Е.В. Маньковская, 2010

торую среднюю скорость конвективного перемещения взвеси в направлении от дна; комбинированная конвективно-диффузионная модель, в которой подъем взвешенного твердого материала определяется суммарным воздействием диффузионного и конвективного потоков. Было отмечено, что расчеты по диффузионной модели хорошо согласуются с данными наблюдений при большой интенсивности волн и плохо – при слабом волнении, в то время как конвективная модель, наоборот, лучше «работает» при меньшей энергии волн, когда существует рифельное строение дна. Тем не менее имеющийся в статье иллюстративный материал свидетельствует, строго говоря, о неудовлетворительности расчетов по всем трем моделям для слабого волнения.

Исследование проблемы движения наносов в рамках кинетической модели, когда взвесь рассматривается как совокупность дискретных частиц, характеризуемых определенными функциями распределения их по размерам, в некоторых отношениях предпочтительнее гидродинамического описания. Частицы взвеси при осаждении в турбулентных потоках из-за собственной инерции приобретают неосциллирующую среднюю составляющую ускорения α_p , направленную против силы тяжести. В подповерхностном слое такого рода пульсационное торможение частиц взвеси составляет малую долю редуцированного ускорения силы тяжести g_p , а непосредственно у самого дна может возрасти более чем на порядок по причине высокой частоты турбулентных флуктуаций скорости в этой области. При разумных упрощениях описания процессов осаждения и подъема терригенных частиц в турбулентном потоке удастся получить равновесную вероятностную функцию $\varphi(W)$ распределения взвешенных твердых частиц по гидравлической крупности W (скорости осаждения в неподвижной воде) [4].

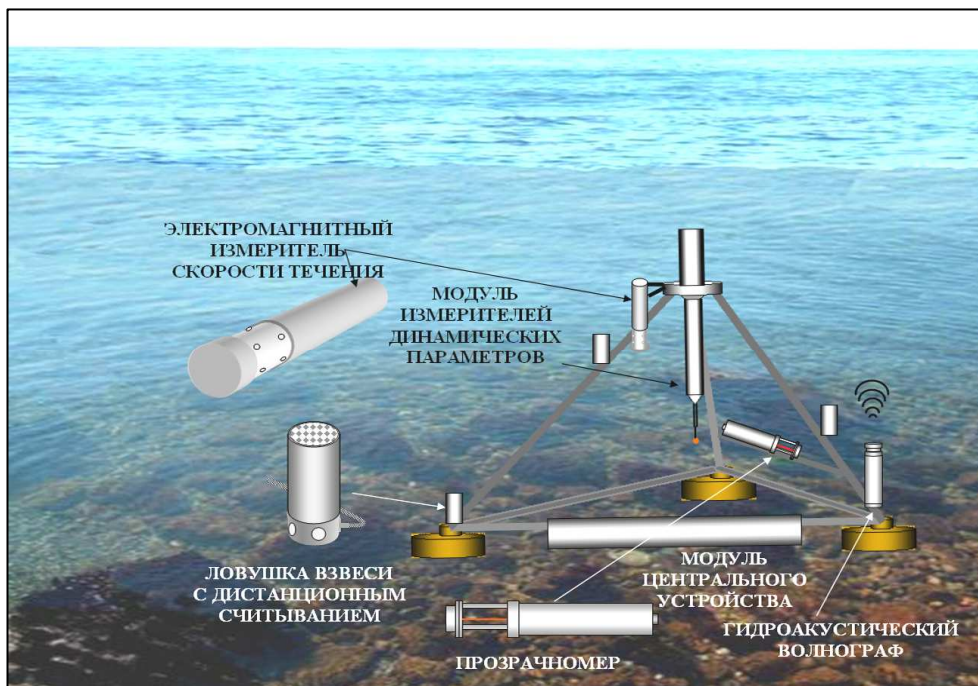
Разработанные функции распределения частиц взвеси для прибрежной области моря зависят от двух параметров. А именно, дисперсия турбулентных флуктуаций скорости определяет расположение участка резкого спада функции распределения в диапазоне больших диаметров, а показатель степени $2q = \gamma = \alpha_p / g_p$ характеризует наклон степенного участка функции в области малых гидравлических и геометрических размеров.

Комбинированная методика расчета характеристик взвеси в прибрежной области моря объединяет (в дополнение к разработанным вероятностным функциям распределения частиц) кинетическую модель интенсивности ветрового волнения, спектральную модель подповерхностной турбулентности, генерируемой волнами, и полуэмпирическую модель пульсирующего придонного турбулентного пограничного слоя [5, 6].

Следует отметить, что для усовершенствования и подтверждения достоверности и кинетических и гидродинамических моделей движения наносов в прибрежной зоне необходимы исходные данные, получаемые в натуральных условиях. Разрабатываемый в МГИ НАН Украины аппаратный комплекс «Донная станция» призван восполнить имеющийся дефицит таких данных и предназначен для проведения измерений характеристик гидродинамических и литодинамических процессов в выбранных районах при различных гидрометеорологических ситуациях.

Аппаратура «Донной станции». Основным инструментом исследований являлся комплекс «Донная станция» (рис. 1), имеющий в своем составе:

- модуль измерителей динамических параметров – измеритель пульсаций трех компонент вектора скорости течения u' , v' , w' ; измеритель температуры T и электропроводности C ; измеритель гидростатического давления; измеритель крена, дифферента и виброускорений по трем осям;
- модуль измерителя показателя ослабления направленного света – прозрачномер;
- модуль трех накопительных измерителей взвеси (ловушек) с дистанционным считыванием количества взвешенного вещества;
- модуль центрального устройства – центральный процессор с флэш-памятью, адаптеры измерительных модулей, трансивер, преобразователь питающих напряжений.



Р и с. 1. Состав измерительного комплекса «Донная станция»

Кроме того, станция оснащена береговым устройством приема информации и сопряжения с персональным компьютером.

Детальное описание конструкции и принципов действия измерительных каналов приводится в работе [5]. Комплекс соединяется с устройством приема информации специальным кабелем в капроновой оплетке – две жилы телефонного кабеля и три нити из полипропилена. Возможен вариант использования кабель-троса.

Электромагнитный измеритель горизонтальных компонент вектора скорости течения и гидроакустический волнограф при проведении натурного эксперимента не использовались, так как находились в стадии лабораторных испытаний.

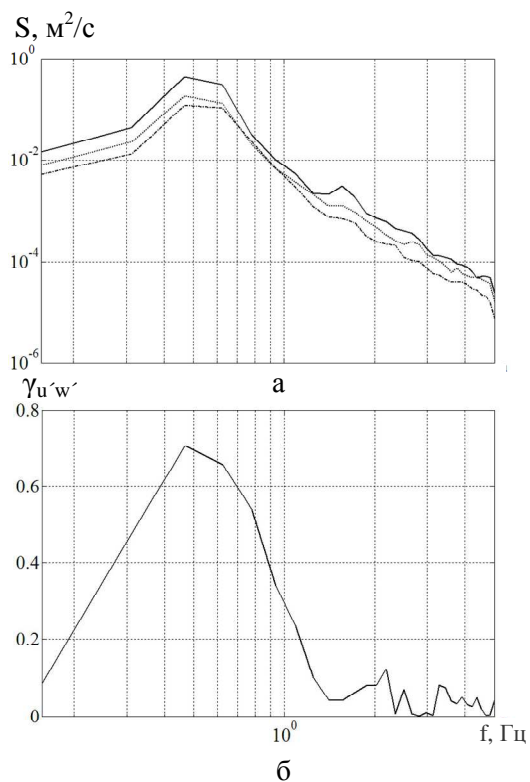
В отсутствие электромагнитного измерителя горизонтальных компонент обеспечение данными о скорости и направлении придонного течения осуществлялось с помощью гидрометрической вертушки (ВГ-1-120/70), которая в отделе гидрофизики шельфа МГИ к моменту проведения экспедиции была модернизирована путем оснащения дополнительным электронным блоком и микроэлектронным компасом, реализующими алгоритм векторного осреднения результатов измерения и накопления на флэш-памяти больших массивов информации. Вертушка устанавливалась рядом с комплексом «Донная станция» на притопленном бугре при эксперименте на о. Коса Тузла и на специальной пирамидальной конструкции при измерениях на побережье около Евпатории. Как показали результаты обработки, осредненные с пятиминутным интервалом данные позволили получить устойчивую оценку скорости и направления течения даже при значительной волновой компоненте и малой средней скорости переноса.

Оперативные данные о скорости и направлении ветра были получены с помощью переносной метеорологической станции *Wireless Weather Station*, которая обеспечивает индикацию текущих и осредненных за период 10 мин значений всех параметров. Кроме того, использовались данные стационарных метеопостов, размещенных на погранзаставе о. Коса Тузла и на территории паралимпийского комплекса «Украина», рядом с которым на мелководье проводились исследования.

Частота опроса каналов модуля измерения динамических параметров и прозрачномера составляет 100 Гц, модуля ловушек взвеси – 1 Гц. Из-за больших объемов информации работа «Донной станции» осуществлялась в режиме прерывания, блоками записей продолжительностью от 10 до 30 мин. Вертушка и метеорологическая станция действовали непрерывно.

Методика работ и анализ полученных данных. В 2008 г. измерения выполнялись в двух экспедициях – на мелководье у о. Коса Тузла 22.08 – 25.08.2008 г. и на западном побережье Черного моря вблизи Евпатории (пос. Заозерное) 02.10 – 03.10.2008 г.

В первой экспедиции исследования проводились в течение четырех дней на юго-восточной оконечности острова, где наблюдалось наиболее интенсивное разрушение берега: с момента приостановки строительства дамбы российской стороной о. Коса Тузла стал короче на 800 м. Комплекс «Донная станция» устанавливался на удалении ~10 м от кромки берега юго-восточной оконечности косы на глубине 1,5 м, в проливе между островом и дамбой, на небольшом слое донных отложений, лежащем поверх защитных плит. Постановки комплекса «Донная станция» и гидрометрической вертушки осуществлялись вручную, без применения каких-либо плавсредств. На ночь вся аппаратура снималась и утром устанавливалась на то же место. «Донная станция» ориентировалась таким образом, что продольная в координатах прибора компонента измеряемых флуктуаций скорости всегда соответствовала меридиональной, а поперечная – зональной составляющей скорости течения. Датчик измерителя пульсаций трех компонент вектора скорости течения и прозрачномер были расположены на высоте 0,25 м над дном, а три песчаные ловушки – на горизонтах 0,25; 0,5; 0,75 м.



Р и с. 2. Спектры S (m^2/c) пульсаций компонент вектора скорости течения (—) u' , (•••) v' , (---) w' (а) и функция когерентности $\gamma_{u'w'}$ (б), характерные для мелководья у юго-восточной оконечности о. Коса Тузла

ности не отмечается. Уровень энергии турбулентности (рис. 2, б) много ниже, чем уровень энергии на волновом участке (рис. 2, а), поэтому можно полагать, что рассчитанная по ряду дисперсия определяется в основном флуктуациями скорости волнового происхождения.

Уровни спектров существенно зависят от скорости ветра в момент измерений, как показано на рис. 3. Здесь представлены спектры флуктуаций продольной компоненты скорости течения u' при различных скоростях ветра. Можно отметить, что в волновой области различие в уровнях примерно на полтора порядка не приводит к существенному изменению частоты максимума. Это означает, что в районе исследований при северных ветрах частота основной волны определяется длиной разгона, а усиление ветра приводит лишь к увеличению крутизны волн. Уровень спектра в турбулентной области изменяется в большей степени – примерно на два порядка.

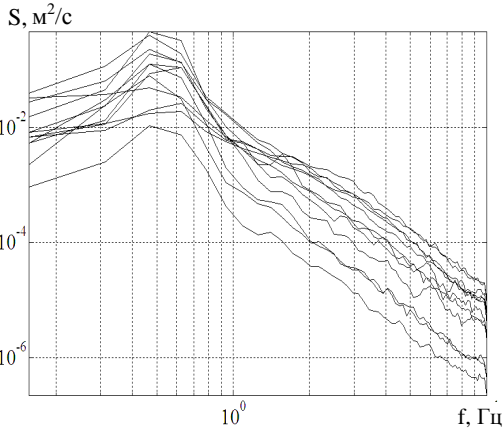
На рис. 4 приведены временные зависимости дисперсий флуктуаций трех компонент вектора скорости течения, суммы этих дисперсий, а также значения скорости ветра северного направления, который усиливался в течение дня 23.08.2008 г. Поскольку вклад турбулентности мал, преобладает тенден-

Всего за время экспедиции было произведено 35 блоков записей данных при ветрах преимущественно северных направлений. Южных и юго-восточных ветров за период эксперимента на о. Коса Тузла не наблюдалось. На рис. 2 приведен характерный пример спектральной обработки данных измерителя пульсаций трех компонент вектора скорости течения. Выбирался участок записи продолжительностью 10 мин, содержащий 60000 отсчетов по каждому каналу. Эти данные осреднялись по пяти точкам, так что максимальная частота в спектре составляла 10 Гц. Спектры пульсаций компонент u' , v' , w' и когерентность между продольной u' и вертикальной w' компонентами рассчитывались по методу *FFT*.

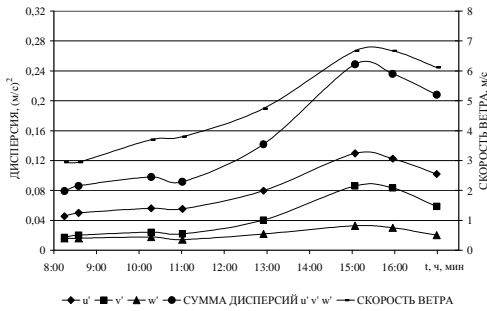
Спектры на рис. 2 характеризуются наличием максимума волновых скоростей на частоте 0,5 Гц, где когерентность между компонентами достигает величины 0,75. На турбулентном участке от 1 до 10 Гц значимой когерентности не отмечается.

ция роста интенсивности волновых скоростей при увеличении скорости ветра. Эта тенденция отчетливо просматривается на рис. 5, где представлена зависимость суммарной дисперсии флуктуаций трех компонент вектора скорости течения от скорости ветра. Для имеющегося диапазона скоростей ветра эта зависимость может быть интерпретирована как линейная.

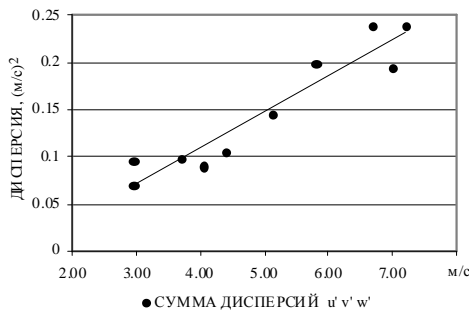
Уже по рис. 4 можно сделать вывод, что изменения энергии волн происходят почти синхронно с изменениями скорости ветра. Данные, полученные 24.08.2008 г., иллюстрируют реакцию волновой системы на изменение направления ветра (рис. 6).



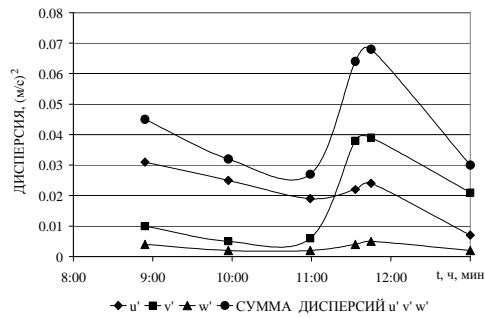
Р и с. 3. Спектры пульсаций продольной составляющей вектора скорости течения u' при различных скоростях ветра у юго-восточной оконечности о. Коса Тузла



Р и с. 4. Временные зависимости дисперсий флуктуаций трех компонент вектора скорости течения, суммы этих дисперсий, а также значения скорости ветра по данным измерений 23.08.2008 г. у о. Коса Тузла



Р и с. 5. Зависимость суммы дисперсий флуктуаций u' , v' , w' от скорости ветра по данным наблюдений 23.08.2008 г. на мелководье у о. Коса Тузла (прямая – линейный тренд)



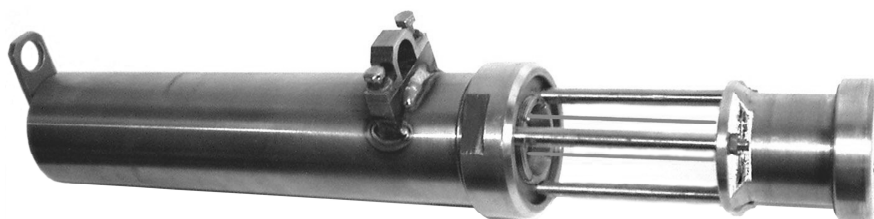
Р и с. 6. Реакция волновой системы на смену направления ветра по данным наблюдений 24.08.2008 г. на мелководье у о. Коса Тузла

Можно отметить, что происходившая с 11 до 12 ч быстрая смена направления ветра с северного на восточное сопровождалась соответствующим увеличением зональной компоненты v волнового движения. По всей видимости,

время реакции волновой системы района исследований у о. Коса Тузла на изменчивость ветров северных направлений не превышает 1 ч.

Обследование ловушек взвеси показало, что в нижней ловушке (0,25 м) количество накопленного материала за 3 сут работы очень небольшое (слой около 5 мм, $\sim 8 \text{ см}^3$), основное содержание – органические вещества различного происхождения (в большей мере растительного), взвеси минерального характера очень мало (около 2 мм, $\sim 3 \text{ см}^3$). Можно сделать вывод, что в период экспедиции во взвешенном состоянии находились в основном частицы органического происхождения, образующиеся в Таманском заливе. Такие частицы имеют меньшую плотность, медленнее осаждаются и не столь эффективно заполняют ловушки, как песчаная взвесь.

Для альтернативного определения параметров взвешенного в воде вещества комплекс «Донная станция» оснащен измерителем показателя ослабления направленного света – прозрачномером (рис. 7).



Р и с. 7. Внешний вид оптического модуля – измерителя показателя ослабления направленного света (прозрачномера)

В работах [7, 8] подробно описан метод определения характеристик дисперсной среды (среднего размера частиц и их концентрации) по флуктуациям ее прозрачности. Техническая реализация метода флуктуаций несложна, и его целесообразно применять для создания оперативных систем наблюдения за динамикой крупнодисперсной взвеси в прибрежной зоне и переносом ее вдоль берега.

Суть метода флуктуаций заключается в следующем. Если через дисперсную среду проходит пучок света небольшого диаметра, то вследствие хаотичного перемещения частиц их число в пучке варьирует, и возникают флуктуации прозрачности среды.

Теория явления показывает, что оптическая плотность среды τ и дисперсия ее прозрачности D связаны со средним размером и концентрацией частиц. Для вычисления характеристик дисперсной среды по флуктуациям ее прозрачности даются следующие формулы [7, гл. 6.3]:

$$s_0 = \frac{D}{I_0^2} \frac{S\tau}{\varphi(\tau)}, \quad r = \sqrt{s_0/\pi}, \quad \bar{n} = \frac{\tau}{I s_0}, \quad \tau = -\ln \frac{\bar{I}}{I_0}, \quad (1)$$

где s_0 – средняя площадь поперечного сечения частиц; D – дисперсия интенсивности пучка света за время измерений; I_0 – начальная интенсивность светового пучка, проходящего через дисперсную среду; S – площадь попереч-

ного сечения пучка света, проходящего через дисперсную среду; τ – оптическая плотность среды в пучке света; $\varphi(\tau)$ – специальная функция; r – средний радиус частиц; \bar{n} – концентрация частиц данного радиуса; l – расстояние, проходимое пучком света в дисперсной среде; \bar{I} – средняя за время измерений интенсивность пучка света, прошедшего через дисперсную среду.

Специальная функция $\varphi(\tau) = 2\pi \int_0^{\pi} \exp\left(\frac{\tau(\varphi - \sin \varphi)}{\pi} - 1\right) \sin \varphi d\varphi$ связы-

вает дисперсию D с оптической плотностью среды τ и средним числом частиц в просвечиваемом объеме \bar{N} . Она рассчитывается теоретически [7, табл. 6.3].

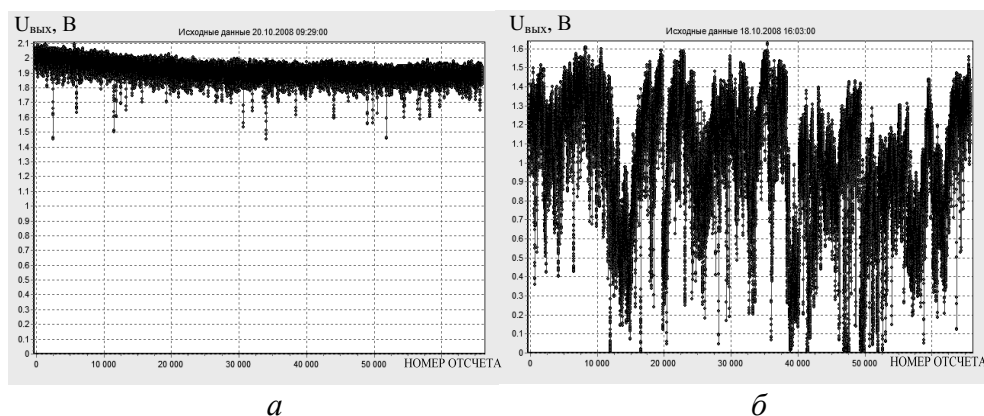
Метод флуктуаций, описанный в указанных работах для взвеси, состоящей из сферических частиц, можно применять и к несферическим частицам, каковыми являются частицы морской взвеси. В этом случае рассчитывается среднее поперечное сечение частиц в пучке. Пример такого приложения приведен в статье [9], в которой исследовались взвеси, содержащие частицы каолина и целлюлозного волокна, имеющие несферическую сложную форму.

Расчетные формулы (1) выведены для случая, когда в дисперсной среде, через которую проходит луч света прозрачномера, ослабляют свет только находящиеся в среде частицы, а сама среда свет не ослабляет [7, гл. 6.3]. Такой средой может быть, например, воздух, имеющий очень низкий показатель ослабления света.

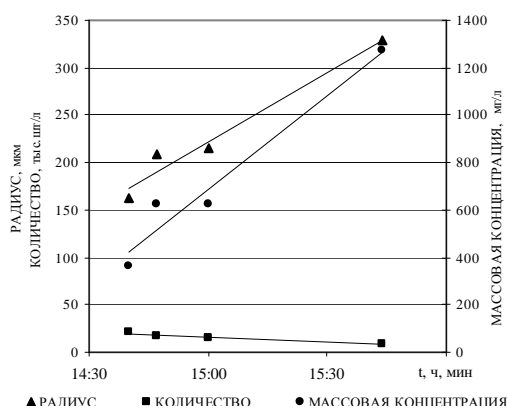
В случае, когда средой, содержащей взвешенные частицы, является морская вода, ослабление света происходит за счет самой воды (которая существенно ослабляет свет, особенно в длинноволновой области, где производится измерения флуктуаций прозрачности дисперсной среды), а также из-за наличия растворенного органического вещества (желтого вещества) и взвеси, состоящей из мелких и крупных частиц. Флуктуации прозрачности воды вызывают крупные частицы с радиусами порядка 10 мкм и более. Остальные вещества представляют собой не флуктуирующий «оптический фон», который необходимо учитывать. Методика расчета параметров взвешенного вещества для морской воды изложена в работе [10].

На рис. 8 приведены примеры типичных реализаций выходного напряжения $U_{\text{вых}}$ измерительного тракта прозрачномера в спокойных и штормовых условиях, на основании которого рассчитывались параметры взвеси в описываемых натуральных исследованиях.

На рис. 9 представлены результаты обработки записей прозрачномера, полученных в районе о. Коса Тузла. В течение дня 22.08.2008 г. происходило усиление ветра от 2,5 до 5,9 м/с. Можно отметить рост со временем массовой концентрации и среднего радиуса частиц взвеси при уменьшении количества регистрируемых частиц в единице объема. Таким образом, примерно двукратное увеличение среднего радиуса частиц компенсирует двукратное же уменьшение их количества. После смены направления ветра 25.08.2008 г. и уменьшения его скорости была отмечена другая тенденция – количество частиц и массовая концентрация взвешенного вещества стали одновременно снижаться при слабом уменьшении среднего радиуса.



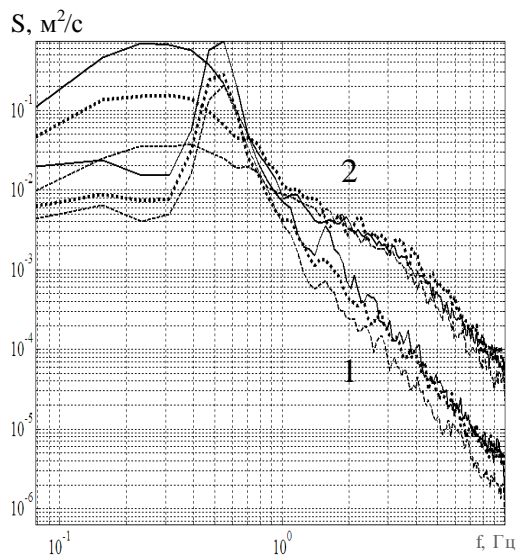
Р и с. 8. Типичные примеры реализаций прозрачности морской воды на мелководье (выходного напряжения $U_{\text{вых}}$ измерительного тракта прозрачномера) при различных гидрометеорологических условиях: *а* – штиль, *б* – волнение 3 балла



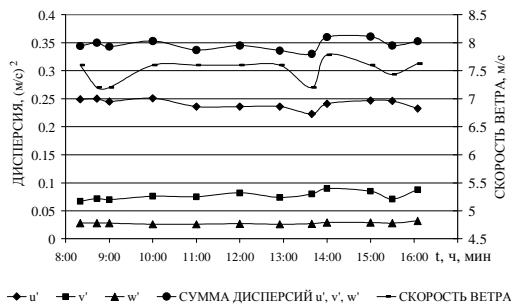
Р и с. 9. Изменение параметров взвешенного вещества (среднего радиуса частиц, их количества и массовой концентрации) при увеличении скорости ветра по данным наблюдений 22.08.2008 г. у о. Коса Тузла (прямые – линейные тренды)

Вторая экспедиция 02.10 – 03.10.2008 г. в районе Евпатории (пос. Заозерное) проводилась с тем же составом аппаратуры. Небольшое изменение методики заключалось в использовании для подвески модернизированной гидрометрической вертушки специальной пирамидальной конструкции взамен притопленного буя, что было вызвано значительными скоростями волнового движения в придонном слое. Комплекс «Донная станция» устанавливался на несколько меньшей глубине (1 м). В первый день, при устойчивом ветре около 7,5 м/с, станция ставилась вблизи берега в зоне бурунов; во второй день, когда ветер стих, аппаратура размещалась на такой же глубине значительно мористее, где регулярные обрушения практически отсутствовали. Всего во второй экспедиции было получено 30 блоков записей данных.

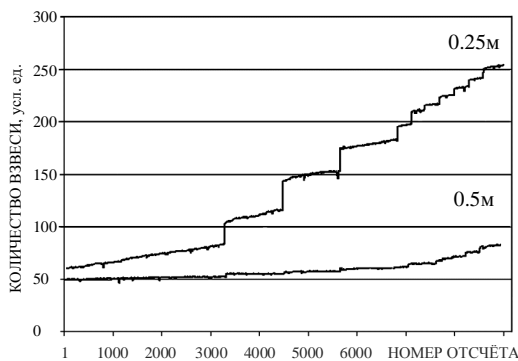
Район пос. Заозерное открыт для южных и юго-западных ветров и характеризуется другой гидродинамической ситуацией по сравнению с о. Коса Тузла. На рис. 10 приведены характерные спектры, полученные в результате обработки данных измерителя пульсаций трех компонент вектора скорости течения для этих двух районов при близких значениях скорости ветра.



Р и с. 10. Длинноволновые участки спектров пульсаций компонент вектора скорости течения (—) u' , (•••) v' , (---) w' по измерениям у юго-восточной оконечности о. Коса Тузла (кривые 1) и на мелководье в районе Евпатории (кривые 2)



Р и с. 11. Гидрометеорологическая ситуация в течение дня 02.10.2008 г. в районе Евпатории



Р и с. 12. Изменение уровня накопленной взвеси в нижней (горизонт 0,25 м) и средней (0,5 м) ловушках по данным наблюдений 02.10.2008 г. в прибрежной зоне моря в районе Евпатории

Волновой участок спектра, рассчитанного для района Евпатории, занимает более широкую область, и максимум его смещен в сторону низких частот. Соответственно волны оказываются гораздо более длинными, и генерируемая в подповерхностном слое турбулентность медленнее затухает с глубиной. В результате уровень турбулентности, регистрируемой на высоте 0,25 м над дном, на побережье около Евпатории оказывается примерно на порядок выше, чем у о. Коса Тузла.

Гидрометеорологическая ситуация в течение дня 02.10.2008 г. иллюстрируется рис. 11.

Можно отметить, что величины дисперсий всех компонент скорости в волновом участке спектра практически не меняются со временем при устойчивом ветре юго-западного направления.

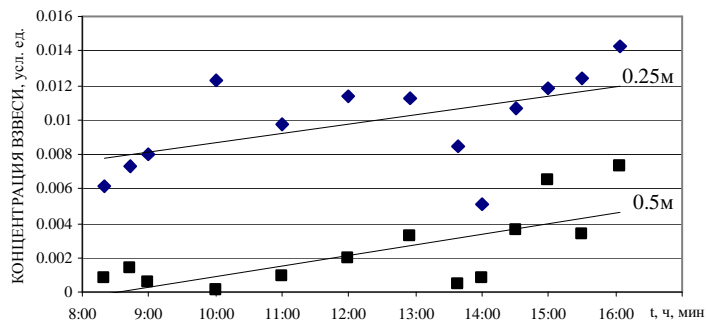
Концентрация взвеси, рассчитанная по данным накопительных измерителей взвеси – ловушек с дистанционным считыванием, представлена на рис. 12. Здесь приводятся графики нарастания уровня накопленной взвеси в нижней (горизонт 0,25 м) и средней (0,5 м) ловушках. Поскольку ловушки, как и весь комплекс «Донная станция», включались в режиме прерывания, на графике заметны скачки, соответствующие накоплению за периоды «молчания»; информация о накоплении взвеси заложена в изменении показаний в процессе измерения. Можно отметить, что в течение дня скорость накопления взвешенного материала в обеих ловушках повышается.

Концентрация взвеси $C_{л}$ по показаниям ловушек определяется в соответствии с выражением [11]

$$C_{л} = K_{\text{л}} dm / dt . \quad (2)$$

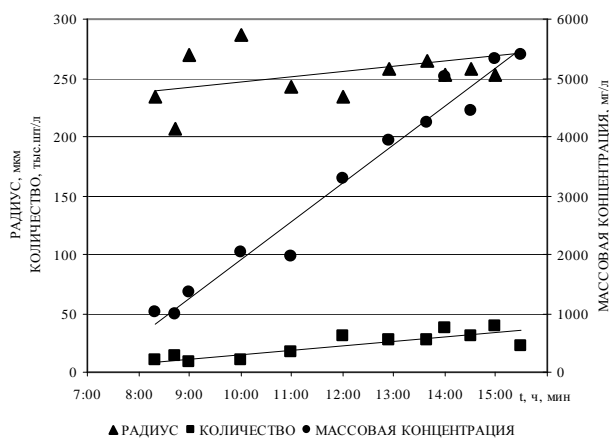
Здесь $K_{\text{л}}$ – тарировочный коэффициент, dm / dt – скорость накопления взвеси в ловушке.

Рассчитанные в соответствии с формулой (2) величины концентрации взвеси представлены на рис. 13. Несмотря на большой разброс значений производных dm / dt , можно отметить устойчивое различие концентраций на горизонтах и заметный тренд в сторону повышения концентрации взвеси в течение дня 02.10.2008 г.

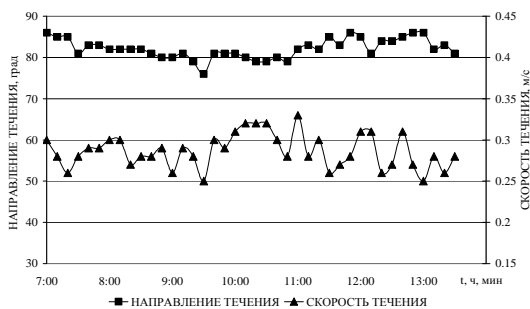


Р и с. 13. Изменение концентрации взвеси по данным ловушек на горизонтах 0,25 и 0,5 м по данным измерений 02.10.2008 г. на мелководье в районе Евпатории (прямые – линейные тренды)

На рис. 14 показана изменчивость в течение дня 02.10.2008 г. характеристик взвеси, вычисленных по показаниям прозрачномера. Средний радиус взвешенных частиц и их количество на единицу объема увеличиваются медленно, вместе с тем наблюдается сравнительно быстрый рост массовой концентрации взвеси.



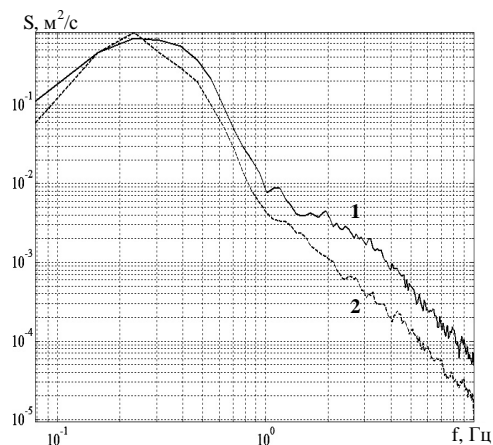
Р и с. 14. Изменение параметров взвешенного вещества (среднего радиуса частиц, их количества и массовой концентрации) при стабильном ветре по данным наблюдений 02.10.2008 г. в прибрежной зоне моря в районе Евпатории (прямые – линейные тренды)



Р и с. 15. Характеристики течения в прибрежной полосе во время шторма по данным наблюдений 02.10.2008 г. в районе Евпатории

обсуждаться ниже в разделе «Заключение».

На второй день 03.10.2008 г. метеорологическая обстановка изменилась, слабый ветер со скоростью около 2 м/с был неустойчивым по направлению, соответственно отсутствовала ветровая волна.



Р и с. 16. Спектры пульсаций продольной компоненты вектора скорости течения по данным измерений 02.10.2008 г. (кривая 1) и 03.10.2008 г. (кривая 2) в прибрежной зоне моря в районе Евпатории

На рис. 17 можно приближенно оценить величину времени спада t_B энергии волн E_B в соответствии с выражением

$$E_B(t) = E_B(0)e^{-t/t_B}.$$

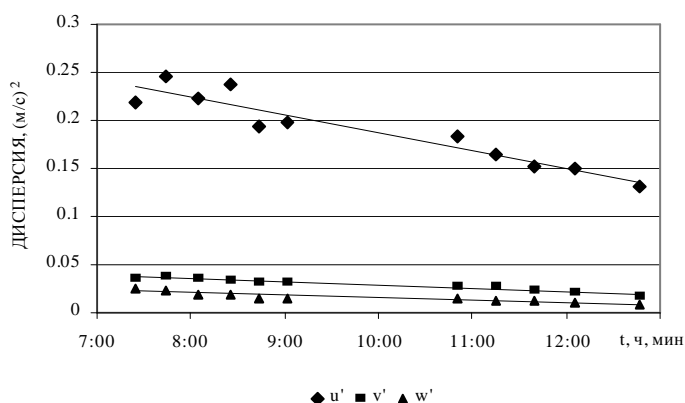
В результате расчета получим $t_B \approx 10$ ч.

На рис. 18 приведены зависимости от времени дисперсий турбулентных флуктуаций трех компонент вектора скорости течения в диапазоне частот от 1 до 50 Гц, полученные путем соответствующей фильтрации исходных рядов.

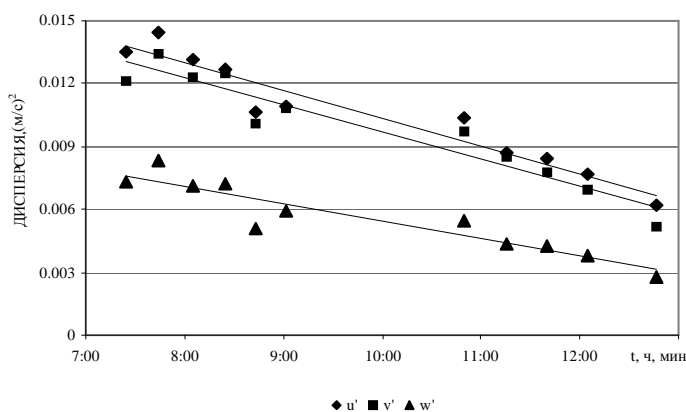
На рис. 15 приведены характеристики течения в прибрежной полосе в районе Евпатории, полученные с помощью гидрометрической вертушки в первый день измерений во время шторма. Течение направлено вдоль берега, и его скорость примерно постоянна. Подчеркнем, что при практическом постоянстве всех гидрометеорологических параметров по данным прозрачного ра и ловушек взвеси наблюдается устойчивый рост концентрации взвеси. Это явление будет отдельно

На рис. 16 показаны спектры пульсаций продольной компоненты вектора скорости течения для первого и второго дней евпаторийской экспедиции. Можно отметить, что во второй день спектр в волновой области стал уже, а уровень турбулентности существенно уменьшился. В течение дня интенсивность зыби монотонно снижалась. На рис. 17 представлены зависимости от времени дисперсий флуктуаций трех компонент скорости течения во всем диапазоне частот от 0,1 до 50 Гц. Эти графики можно интерпретировать как изменение энергии волновых движений, поскольку вклад турбулентности здесь невелик. Предполагая, что после прекращения действия ветра волны затухают экспоненциально, по дан-

В соответствии с расчетом по данным рис. 18 (аналогично расчету для рис. 17) величина времени спада t_T энергии турбулентности E_T составляет $t_T \approx 7,7$ ч. Можно считать, что турбулентность затухает несколько быстрее, чем волны.



Р и с. 17. Изменение во времени дисперсии флуктуаций компонент вектора скорости течения u' , v' , w' в диапазоне частот 0,1 – 50 Гц по данным измерений 03.10.2008 г. на мелководье в районе Евпатории (прямые – линейные тренды)

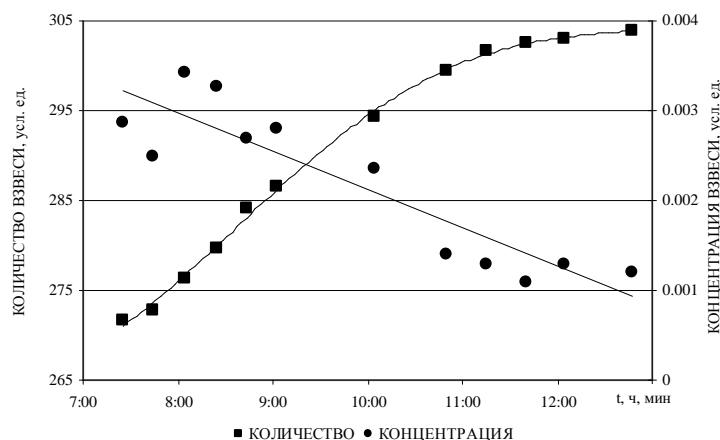


Р и с. 18. Изменение во времени дисперсии турбулентных флуктуаций компонент вектора скорости течения u' , v' , w' в диапазоне частот 1,0 – 50 Гц (прямые – линейные тренды)

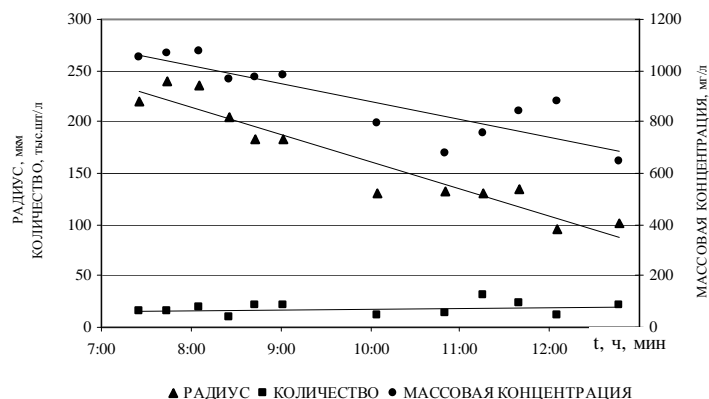
Изменение вычисленной концентрации взвеси по данным нижней ловушки (0,25 м) во второй день измерений евпаторийской экспедиции показано на рис. 19. При существенном разбросе полученных значений наблюдаемый спад концентрации $C_{\text{л}}$ может характеризоваться рассчитанной постоянной времени $t_{\text{л}} \approx 7,5$ ч, что практически совпадает с t_T .

На рис. 20 представлена соответствующая изменчивость характеристик взвеси, рассчитанных по данным прозрачного для 03.10.2008 г. Можно отметить, что при практически постоянном количестве частиц спад концентра-

ции происходит за счет уменьшения их среднего радиуса. Рассчитанная постоянная времени t_{Π} снижения уровня концентрации по измерениям прозрачности C_{Π} составляет $t_{\Pi} \approx 10,5$ ч, что близко к величине $t_{В}$.



Р и с. 19. Изменение во времени при ослаблении ветра количества накопленной взвеси и ее концентрации по данным ловушки на горизонте 0,25 м 03.10.2008 г. на мелководье в районе Евпатории (прямая – линейный тренд, сплошная кривая – полиномиальный)



Р и с. 20. Изменение параметров взвешенного вещества (среднего радиуса частиц, их количества и массовой концентрации) при резком уменьшении скорости ветра и смене его направления по данным наблюдений 03.10.2008 г. в прибрежной зоне моря в районе Евпатории (прямые – линейные тренды)

Приведенный выше краткий анализ данных натуральных наблюдений, выполненных в 2008 г. с помощью комплекса «Донная станция», не включает рассмотрение результатов измерений температуры, электропроводности, крена, дифферента и виброускорений по трем осям. При сравнительно небольших ветровых нагрузках значения крена, дифферента и виброускорений

оказались пренебрежимо малы, что свидетельствует о надежности конструкции станции.

Заключение. Комплекс аппаратуры «Донная станция» разрабатывается и оснащается с целью получения натурных данных не только для их накопления с последующим построением эмпирических зависимостей, а в основном для верификации численных кинетических моделей и улучшения их прогностических свойств. Важно также исследовать динамику волновых и турбулентных процессов в прибрежной зоне в связи с изменчивостью характеристик движения взвесей. Решению этих задач способствуют повышенная мобильность комплекса, простота его развертывания и возможность проводить измерения в различных географических условиях и при разных гидрометеорологических ситуациях.

Измерения в районе о. Коса Тузла показывают, что при малых разгонах волновая система и характеристики прозрачности вод сравнительно быстро (в пределах 1 ч) реагируют на изменение ветровой ситуации. Интенсивность турбулентности изменяется в более широких пределах, чем энергия поверхностных волн, которая оказывается пропорциональной скорости ветра. Дополнительной характеристикой этого района при северных ветрах является наличие большого количества органической взвеси, приносимой из Таманского залива. Поток песчаной взвеси мал, поскольку образующиеся короткие волны могут характеризоваться лишь сравнительно низкими уровнями придонных волновых скоростей и придонной турбулентности даже при значительных ветрах.

В прибрежной зоне моря около Евпатории при юго-западном ветре генерируются гораздо более длинные волны, которые на мелководье характеризуются большими значениями придонных скоростей и придонной турбулентности. При прекращении ветрового воздействия спад волновой энергии, энергии придонной турбулентности и концентрации взвеси происходит гораздо медленнее, чем при северных ветрах в районе о. Коса Тузла. Рассчитанные постоянные времени здесь больше примерно на порядок.

Измерения в зоне бурунов в первый день евпаторийской экспедиции 02.10.2008 г. показали устойчивый значительный рост концентрации песчаной взвеси при стабильных уровнях волновой и турбулентной энергии и практически постоянном вдольбереговом течении. Такой рост не может объясняться переносом за счет горизонтальных неоднородностей поля прозрачности, поскольку автохтонная песчаная взвесь на глубине 1 м быстро осаждается в течение ~ 2 мин, а при скорости течения 0,3 м/с соответствующий пространственный масштаб будет порядка 30 м. Таким образом, уровень концентрации песчаной взвеси является локальным параметром среды и должен соответствовать динамике волновых и турбулентных движений в прибрежной зоне. По-видимому, в области бурунов регулярные обрушения могут формировать изменения внутренней структуры турбулентности при сохранении ее энергетических параметров.

В целом полученные с помощью измерительного комплекса «Донная станция» результаты натурных исследований представляют собой ценный материал для коррекции и совершенствования кинетических схем расчета характеристик движения наносов в прибрежной области моря.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Іванов В.А., Михинов А.Е.* Прогноз динаміки наносів в прибережній зоні (практичні рекомендації і параметри розрахунків). – Севастополь, 1991. – 52 с. – (Препринт / АН УРСР. МГІ).
2. *Добротворський А.Н., Дружєвський С.А., Кушнір В.М. і др.* Діагностична модель деформацій дна під впливом гідрометеорологічних факторів // *Навігація і гідрографія*. – 2001. – №1. – С. 94 – 103.
3. *Lee T.H., Hanes D.M.* Comparison of field observations of the vertical distribution and its prediction by models // *J. Geophys. Res.* – 1996. – 101, № С 2. – P. 3561 – 3572.
4. *Іванов В.А., Дыкман В.З., Ефремов О.И.* Функція розподілення частіць взвеси в прибережній області моря // *Доп. НАН України*. – 2005. – № 1. – С. 111 – 117.
5. *Современные методы и средства контроля морской среды / Под ред. В.А. Иванова.* – Севастополь: МГІ НАН України, 2006. – 112 с.
6. *Іванов В.А., Дыкман В.З., Ефремов О.И.* Модель придонного турбулентного шару для мелководья // *Морской гидрофизический журнал*. – 2010. – № 2. – С. 49 – 62.
7. *Шифрин К.С.* Введение в оптику океана. – Л.: Гидрометеиздат, 1983. – 278 с.
8. *Шифрин К.С., Мороз Б.З., Сахаров А.Н.* Определение характеристик дисперсной среды по данным о ее прозрачности // *Докл. АН СССР*. – 1971. – 199, № 3. – С. 581 – 598.
9. *Шифрин К.С., Сахаров А.Н., Новогрудский Б.В. и др.* Определение флуктуационным методом весовой концентрации взвеси в коллоидных системах с частицами произвольной формы // *Докл. АН СССР*. – 1974. – 215, № 5. – С. 1085 – 1086.
10. *Маньковская Е.В., Маньковский В.И.* Информационная технология обработки измерений флуктуаций прозрачности морской среды для определения параметров крупной взвеси // *Системы контроля окружающей среды*. – Севастополь: МГІ НАН України, 2008. – С. 137 – 139.
11. *Dynamical processes in coastal regions / Ed. Vladimir Popov.* – Sofia: Publishing house of the Bulgarian Academy of sciences, 1990. – 190 p.

Морской гидрофизический институт НАН Украины,
Севастополь
E-mail: vdykman@alpha.mhi.iuf.net

Матеріал надійшов
в редакцію 26.05.09
Після доробки 30.06.09

АНОТАЦІЯ У статті представлено результати вимірювань за допомогою апаратурного комплексу «Донна станція» в прибережній зоні шельфу Криму поблизу Євпаторії і біля південно-східного краю о. Коса Тузла. При однакових за силою вітрах в цих районах інтенсивність хвиль і турбулентності в прибережній зоні поблизу Євпаторії набагато більші, відповідно і потоки зважених осадів тут інтенсивніші. Отримані дані призначені для коректування кінетичної моделі розрахунку характеристик поля зважених осадів на мелководді.

ABSTRACT Presented are the results of measurements carried out by the instrumental complex «Donnaya stantsiya» on the Crimean shelf zone nearby Evpatoria and at the south-east extremity of the island Kosa Tuzla. At similar wind strengths in these regions, wave and turbulent intensity in the Evpatoria coastal zone is significantly higher, hence the flows of suspended sediment are also more intensive. The obtained data are intended to correct the kinetic model for calculating the characteristics of suspended sediment fields in shallow water.