

В.А.Иванов, В.М.Кушнир, С.В.Федоров

Морской гидрофизический институт НАН Украины, г.Севастополь

ЛИТОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В КЕРЧЕНСКОМ ПРОЛИВЕ ПО ДАННЫМ КОСМИЧЕСКИХ СЪЕМОК ОПТИЧЕСКИМИ СКАНЕРАМИ

Выполнены расчеты удельного переноса донного материала в Керченском проливе для различных метеорологических условий. Для расчетов использовались значения концентрации взвеси и динамическая скорость на морском дне, определенные по данным оптического сканера *MODIS (Terra & Aqua)*. Получена логарифмическая зависимость удельного переноса донного материала от скорости ветра, позволяющая использовать эту зависимость для оперативного мониторинга литодинамических процессов в Керченском проливе.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *удельный перенос донного материала, оптические сканеры MODIS, оперативный прогноз литодинамических процессов.*

Керченский пролив имеет большое значение для экономики Украины и России как важная транспортная магистраль между портами Азовского и Черного морей с выходом в Мировой океан, зона рыболовства и рекреации. По этим и другим причинам проблема изменчивости рельефа дна под действием волн и течений приобрела здесь высокую актуальность, которая резко возросла после сооружения в 2003 г. дамбы от Таманского п-ова в направлении украинского о.Коса Тузла и искусственном углублении протока между оконечностью дамбы и восточной частью этого острова. Эти изменения рельефа дна в значительной степени повлияли на естественное поле течений, следствием чего была интенсификация процессов размыва о.Коса Тузла. Так, на протяжении 2005 г. – первой половины 2006 г. территория острова из-за отсутствия работ по его укреплению уменьшилась на 30 га. Огромные объемы донного материала, смываемые с острова, оседают в некоторых (пока неизвестных) районах Керченского пролива, что создает потенциальные угрозы для навигации и нарушения естественной экологии этого района Азово-Черноморского бассейна.

Правительство Украины и Автономной республики Крым направили значительные средства для укрепления берегов о.Коса Тузла. На восточной оконечности острова были установлены железобетонные плиты, что несколько стабилизировало процессы эрозии. Тем не менее, как показали наблюдения, процессы размыва продолжают, в результате чего установленные железобетонные плиты оседают. Таким образом, указанные инженерные решения оказались неэффективными в долгосрочной перспективе. Это обстоятельство и потенциальная угроза нарушения естественной экологии Керченского пролива диктуют необходимость проведения физических исследований и анализа литодинамических процессов в этом районе. Эти исследования включают проведение экспериментальных работ, моделирование и прогноз соответствующих изменений рельефа дна в Керченском проливе. В целом, они направлены на сохранение естественной экосистемы

пролива, в том числе укрепления берегов о.Коса Тузла, а также на разработку методов прогноза рельефа дна при проведении любых инженерных работ.

Поверхность морского дна в Керченском проливе представлена в основном слабонесущим грунтом (песок, жидкий ил), и при этом возможны значительные скорости постоянных и волновых придонных течений [1, 2]. При взаимодействии этих течений с поверхностью дна формируются сложные поля скорости течения и давления в виде вихре-волновых структур и мелко-масштабной турбулентности. При определенных условиях эти поля могут воздействовать на донный материал таким образом, что он начинает перемещаться вдоль поверхности дна и подниматься вверх, формируя профили взвешенных наносов. Эти процессы приводят к изменению структуры дна, причем в непосредственной близости от его неровностей могут формироваться глубокие промоины или зоны аккумуляции грунта, которые существенно изменяют поля естественных течений, температуры и других параметров морской среды. Интенсивность процессов эрозии грунта резко усиливается при штормах. С другой стороны, особенностью литодинамических процессов вблизи морского дна является интегральный эффект постепенного развития эрозии донного материала при умеренных гидрометеорологических условиях.

Проблема размыва морского дна и опорных оснований, установленных на нем гидротехнических сооружений, не является новой. Ее изучали последние сто лет, начиная с 1912 – 1914 гг. При этом, главным образом, использовались экспериментальные методы и полученные на их основе эмпирические зависимости, а также общие балансные соотношения для определения основных безразмерных параметров, контролирующих процессы взаимодействия придонных течений с частицами донного материала [3].

В настоящее время изучению процессов локального изменения рельефа морского дна под действием волн и течений посвящено большое число исследований и публикаций. В них представлены результаты численного моделирования, эмпирические и полуэмпирические методы расчетов размыва грунтов различных типов, данные прямых экспериментальных исследования [4 – 21]. Об актуальности этой проблемы свидетельствует проведение серии регулярных специализированных международных конференций, начиная с 2002 г. В связи с большим практическим значением проблемы размыва морского дна и установленных на нем фундаментов гидротехнических систем, созданы различные методы их предотвращения или минимизации этого явления [22 – 26]. Эти методы предусматривают многосекционную конфигурацию основания для уменьшения гидродинамического сопротивления; создание искусственного покрытия вокруг фундамента, главным образом синтетического типа; укладку контейнеров с гравием, ракушкой или песком; применение защитных сеток; насыпка «бермы»; укрепление донного материала при помощи цементирования.

В настоящее время координация международных исследований по проблеме размыва морского дна и опорных оснований гидротехнических сооружений осуществляется *International Society of Soil Mechanics and Geotechnical Engineering Technical Committee #33 on Geotechnics of Soil Erosion, Geo-Institute of the American Society of Civil Engineers, Committee on Geotechnics of Soil Erosion* (<http://ceprofs.tamu.edu/gbiscontin/erosion-gi.htm>).

Традиционные методы литодинамических исследований эрозии и аккумуляции донного материала включают повторяющиеся батиметрические съемки, геологические анализы характеристик донного материала, измерения параметров поверхностных волн, уровня моря и течений. Различные эмпирические и полуэмпирические соотношения используются для расчета турбулентных напряжений вблизи поверхности дна. Предполагается, что под действием этих турбулентных напряжений осуществляется транспорт частиц донного материала вблизи поверхности дна, а также формирование профилей взвешенных частиц. Изменчивость скорости удельного переноса частиц грунта вблизи дна и в виде взвешенных частиц определяет динамику его изменения: в зонах увеличения скорости происходит эрозия, в других локальных участках замедления этой скорости наблюдается оседание частиц и аккумуляция донного материала. Практическая реализация этих традиционных методов связана со следующими проблемами: 1. Проведение больших объемов регулярных натурных измерений требует больших финансовых и временными затратами, а возможность выполнения таких измерений сильно зависит от погодных условий. 2. Все известные методы расчета турбулентных напряжений на поверхности дна предполагают некий средний или преобладающий размер частиц донного материала. На самом деле размеры частиц донного материала и их процентное соотношение изменяются в широких пределах, что делает оценку турбулентных напряжений неоднозначной. Это определяет значительные ограничения традиционных методов и очень редкое их использование в полном объеме, несмотря на острую практическую необходимость проведения таких исследований для защиты морских берегов, в том числе о.Коса Тузла, пляжей и гидротехнических сооружений, установленных на морском дне.

Возможная альтернатива указанных традиционных методов связана с широким использованием методов дистанционного зондирования в соединении с современными средствами численного моделирования гидрофизических и литодинамических процессов. В настоящее время имеются следующие предпосылки для успешного решения указанной проблемы: (i) Спутниковые методы измерения характеристик морской поверхности и прилегающей береговой территории, в том числе скорости приводного ветра, локальных изменений уровня, восходящего излучения в оптическом (400 – 700 нм) и ИК диапазонах; (ii) Численные методы расчета поля поверхностных волн, течений и удельного транспорта донного материала, в том числе для несвязных и связных типов грунта морского дна [27, 28]. Эти возможности используются ниже для создания базовой технологии мониторинга литодинамических процессов в Керченском проливе на основе данных дистанционного зондирования, т.е. данные спутниковых измерений составляют основу численного моделирования параметров поверхностных волн и течений, концентрации взвешенных наносов, расчетов их удельного транспорта, а также динамики рельефа дна при изменениях гидрометеорологических условий. В конечном итоге это позволяет обосновать рекомендации по выполнению берегоукрепительных работ (в том числе предотвращения размыва о.Коса Тузла), обеспечения безопасной навигации, экологии, рыбного промысла и освоения энергетических ресурсов.

Материалы и методы. В настоящей работе использованы результаты непосредственных измерений концентрации взвеси (C_S , г/м³) и глубины видимости белого диска (Z_d , м), полученные в Керченском проливе 6 – 7 октября 2008 г. и 18 апреля 2009 г. экспедициями Южного научного центра РАН. Пробы воды из поверхностного горизонта (0 – 0,3 м) отбирались стеклянным сосудом, переносились в фильтровальную установку из поликарбонатного пластика фирмы Сарториус (ФРГ) и фильтровали при пониженном давлении через стекловолоконные фильтры диаметром 47 мм и размером пор 0,7 мкм. Фильтры предварительно прокаливали в муфельной печи 8 ч при температуре 450 °С, высушивали их до постоянного веса, взвешивание проводилось на электронных аналитических весах (САРТОГОСМ ЛВ210-А) [29].

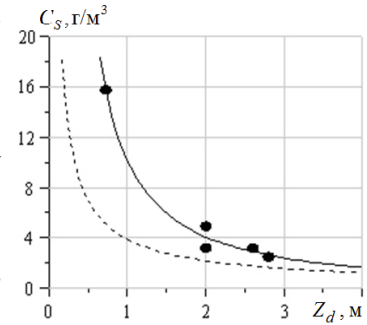
Поля течений и поверхностных волн в Керченском проливе формируются под действием ветра и перепада уровня между Азовским и Черным морями, и, в то же время, в значительной мере определяются сложным рельефом дна в этом районе. Параметры этих полей влияют на придонные турбулентные напряжения и профили взвешенных частиц донного материала. Значительное разнообразие характеристик дна (песок, ил, водоросли) при этих условиях отражается на распределении взвеси на морской поверхности. Эти сложные и нетипичные условия формирования прозрачности (глубины видимости белого диска Z_d , м) и концентрации взвеси (C_S , г/м³) в Керченском проливе необходимо учитывать при использовании космических съемок для расчетов пространственных распределений этих параметров. В настоящей работе были использованы данные непосредственных измерений глубины видимости белого диска Z_d и концентрации взвеси в восьми точках Керченского пролива. Таблица этих данных приведена ниже.

Как известно, существует корреляция между концентрацией взвеси C_S и глубиной видимости белого диска Z_d , а соответствующая регрессионная зависимость описывается соотношением $C_S = 4,59 \cdot Z_d^{-0,85}$ [30]. Эта зависимость не является универсальной и, как правило, такое функциональное соотношение имеет хорошо выраженный региональный характер. Это подтверждается приведенными выше данными измерений в Керченском проливе. На рис.1 показаны зависимости $C_S = f(Z_d)$ по данным непосредственных измерений и по приведенному выше соотношению из [29].

Т а б л и ц а 1. Данные прямых измерений C_S и Z_d в Керченском проливе, выполненных экспедициями ЮНЦ РАН.

№ ст.	год	дата	время	с.ш.	в.д.	Z_d , м	C_S , г/м ³
27	2009	18.04	14:30	45,44	36,72	3,25	3,10
29	2009	18.04	15:42	45,31	36,54	2,50	3,15
31	2009	18.04	17:15	45,22	36,49	3,75	–
24	2008	07.10	12:53	45,11	36,60	3,5	2,43
20	2008	06.10	20:03	45,51	36,69	–	2,40
21	2008	07.10	08:49	45,37	36,67	–	13,5
23	2008	07.10	12:00	45,18	36,50	2,5	4,87
22	2008	07.10	10:31	45,26	36,22,49	0,9	15,7

Р и с . 1 . Зависимости концентрации взвеси C_S от глубины видимости белого диска Z_d по данным прямых измерений (●) и соответствующая линия регрессии $C_S = 13,56 \cdot Z_d^{-1,33}$, достоверность аппроксимации $R^2 = 0,952$. Прерывистой линией показана аналогичная зависимость из [30].



Видно, что обе эти зависимости имеют вид степенных функций, но, в то же время, их параметры различаются, что, вероятно, связано с учетом региональных особенностей Керченского пролива.

Были использованы также данные первого уровня обработки оптического сканера системы MODIS с пространственным разрешением 250 м для ближайших дат выполнения прямых измерений при отсутствии облачности. Как известно, такие данные свободно распространяются NASA по сети Internet (<http://ladsweb.nascom.nasa.gov/data/search.html>).

Первичная обработка выполнена на основе программы Beam VISAT 2.3 и включала отбор двух каналов, соответствующих длинам волн 0,645 и 0,8585 мкм, выделение области, содержащей Керченский пролив, оцифровку данных в единицах яркости ($\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{стр}^{-1} \cdot \text{мкм}^{-1}$), привязку каждого пикселя к географическим координатам. Были выбраны изображения, соответствующие безоблачным условиям и обработаны мультиспектральные снимки, относящиеся к указанным датам. Для этих же условий была определена скорость ветра по данным спутника QuikScat: 6 – 7 октября 2008 г. преобладал ветер северного, северо-восточного направлений со средней скоростью 10,5 м/с, в апреле 2009 г при таком же направлении ветра его скорость находилась в пределах 5 – 7 м/с.

В качестве информативного параметра для расчётов глубины видимости белого диска и концентрации взвеси использован индекс цвета, который определяются как комбинация данных оптических каналов с различными длинами волн [31]. Одна из таких комбинаций представляет собой отношение нормализованной яркости $L_{WN}(\lambda)$ в двух спектральных участках, т.е.

$$I_{wn}(\lambda_1 / \lambda_2) = L_{wn}(\lambda_1) / L_{wn}(\lambda_2). \quad (1)$$

Использованы длины волн $\lambda_1 = 0,645$ мкм и $\lambda_2 = 0,8585$ мкм, соответствующие максимальному пространственному разрешению 250 м.

Вычисление нормализованной яркости восходящего излучения морской поверхности на указанных длинах волн основано на упрощенном соотношении атмосферной коррекции следующего вида:

$$L_T(\lambda) = L_A(\lambda) + L_R(\lambda) + L_w(\lambda)t(\lambda), \quad (2)$$

где $L_T(\lambda)$ – яркость излучения, измеряемая бортовым фотометром на длине волны λ ; $L_w(\lambda)$ – яркость восходящего излучения морской поверхности; $L_A(\lambda)$, $L_R(\lambda)$ – величины яркости, обусловленные аэрозольным и молекулярным (релеевским) рассеянием в атмосфере; $t(\lambda)$ – коэффициент пропускания атмосферы, равный $\exp\{-[0,5 \tau_R(\lambda) + \tau_{Oz}(\lambda)](\cos \theta_v)^{-1}\}$; $\tau_R(\lambda)$ – оптическая толщина слоя молекулярного рассеяния $[\lambda]$, мкм; τ_{Oz} – оптическая толщина озонового слоя; θ_v – зенитный угол бортового фотометра.

Атмосферная коррекция яркости в рассматриваемом случае основана на анализе измеренных сигналов, относящихся к области относительно прозрачных вод Чёрного моря, примыкающей к Керченскому проливу. Для таких вод интенсивность восходящего излучения для длин волн 0,645 и 0,8585 мкм пренебрежимо мала. Поэтому минимальные сигналы яркости, измеренные фотометром спутника, соответствуют яркости атмосферных сигналов. Предполагая, что масштаб изменчивости атмосферных характеристик значительно превышает расстояние от Керченского пролива до ближайшего глубоководного района Черного моря, можно записать следующее соотношение для индекса цвета:

$$I_{wn}(0,645/0,8585) = \frac{L_t(0,645) - \min[L_t(0,645)]}{L_t(0,8585) - \min[L_t(0,8585)]} \cdot P(0,645/0,8585), \quad (3)$$

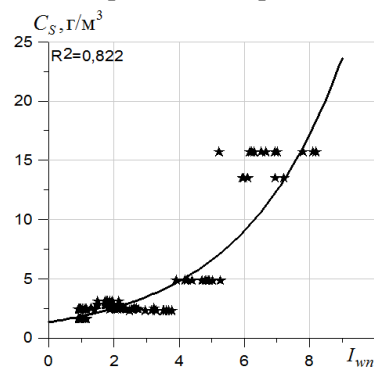
где $\min[L_t(0,645)]$, $\min[L_t(0,8585)]$ – минимальные величины измеренных сигналов на указанных длинах волн, относящиеся к прозрачным водам глубоководной части Чёрного моря, $P(0,645/0,8585)$ – поправочный множитель, учитывающий пропускание атмосферы и пересчёт яркости восходящего излучения в яркость нормализованного восходящего излучения, равный

$$P\left(\frac{0,645}{0,8585}\right) = \exp\left\{\left[\frac{\tau_R(0,645) - \tau_R(0,8585)}{2} + \tau_{Oz}(0,645) - \tau_{Oz}(0,8585)\right]\left(\frac{1}{\cos\theta_v} + \frac{1}{\cos\theta_s}\right)\right\}.$$

В диапазоне изменения зенитных углов спутника θ_v и Солнца θ_s от нуля до 60° , относительные изменения поправочного множителя не превышают $\pm 6\%$. Для длины волны 0,645 мкм величины τ_R , τ_{Oz} равны 0,0504 и 0,0219 соответственно, для 0,8585 мкм – 0,0162 и 0,00154.

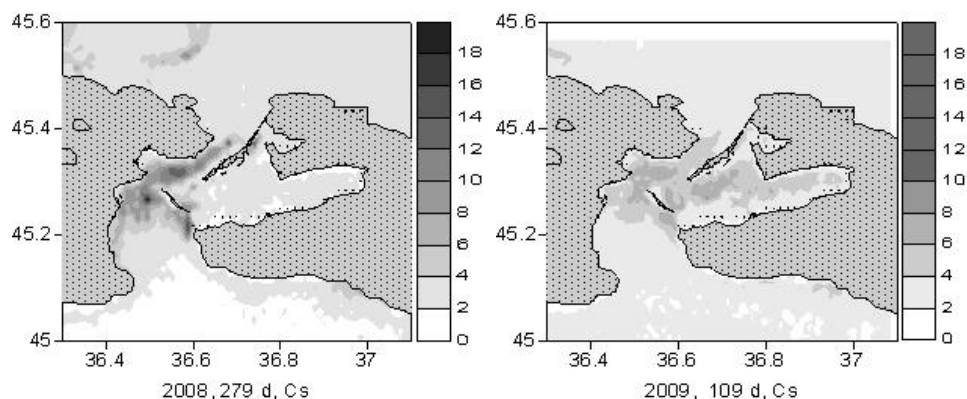
Полученные распределения $I_{wn}(0,645/0,8585)$, в дальнейшем будет использоваться обозначение I_{wn} , связаны с концентрацией взвешенного вещества C_S в приповерхностном слое моря.

Данные оптического сканера *MODIS/Terra* для Керченского пролива были получены для наиболее близких условий проведения экспедиционных работ ЮНЦ РАН при отсутствии облачности, т.е. 5 октября 2008 г. (10:55 GMT) и 19 апреля 2009 г. (10:30 GMT). По данным съёмок были вычислены пространственные распределения индекса цвета I_{wn} , которые использованы для определения эмпирической зависимости $C_S = f(I_{wn})$. С этой целью 10 – 15 значений индекса цвета I_{wn} отбирались таким образом, чтобы расстояние до точки прямых измерений не превышало 0,5 – 1 км. Эта зависимость представлена на рис.2.



Значительный разброс экспериментальных значений относительно линии регрессии на рис.2 объясняется неточным совпадением времени прямых измерений и космических съёмок, резкими градиентами естественной изменчивости оптических характеристик,

Р и с . 2 . Зависимость $C_S = f(I_{wn})$ – звездочки и линия регрессии $C_S = 1,3326 \cdot \exp(0,3194 \cdot I_{wn})$. $R^2 = 0,822$ – достоверность аппроксимации.



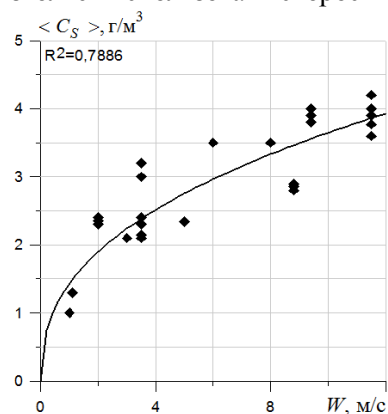
Р и с . 3 . Пространственное распределение концентрации взвеси C_S (г/м³) по данным космической съемки 5 октября 2008 г. Средняя скорость ветра равна 10,4 м/с

Р и с . 4 . Пространственное распределение концентрации взвеси C_S (г/м³) по данным космической съемки 19 апреля 2009 г. Средняя скорость ветра 6 м/с

допущениями при расчете I_{wn} и погрешностями дистанционного зондирования. Тем не менее, величина достоверности аппроксимации экспериментальных данных оказались достаточно высокими, что позволяет использовать полученные эмпирические зависимости для расчетов полей прозрачности (глубины видимости белого диска) и концентрации взвеси для рассматриваемых условий. Учитывая высокую корреляцию между глубиной видимости белого диска и концентрацией взвеси, эмпирическая зависимость между этими величинами представлена в следующем виде: $Z_d = 5,722 \cdot \exp(-0,24 \cdot I_{wn})$. Пространственные распределения концентрации взвеси для указанных условий представлены на рис.3, 4. На всех распределениях выделяются локальные области высокой концентрации взвеси в Керченском проливе.

Как известно, концентрация взвеси в Азовском море сильно зависит от скорости ветра [31]. Для уточнения этой зависимости были дополнительно отобраны и обработаны космические съемки Керченского пролива при различных величинах скорости ветра. По этим данным была построена зависимость средней концентрации взвеси в Керченском проливе от скорости ветра (рис.5). Видно, что существует высокая корреляция между этими величинами. Это позволяет использовать скорость ветра как прогностический параметр для предварительных оценок изменения оптических характеристик в анализируемом районе.

В общей проблеме литодинамических процессов в морских прибрежных районах ключевую роль играет удельный транспорт q (м²/с) донного материала под действием турбулентных потоков, индуцированных волна-



Р и с . 5 . Зависимость средней концентрации взвеси от скорости ветра и регрессионная зависимость $\langle C_S \rangle = 1,4327 \cdot W^{0,4059}$, R^2 — достоверность аппроксимации.

ми и течениями. Общие положения по переносу грунта в таких условиях рассмотрены в [4 – 19] и во многих других работах.

Показано, что формирование придонного слоя движущихся донных осадков под действием стационарных и волновых течений определяется, главным образом, характеристиками течения и средним размером частиц донного материала d , а в качестве одного из определяющих безразмерных параметров используется число Шильдса (*Shields numbers*), которое можно записать в следующем виде:

$$Y = \frac{v_*^2}{\gamma' g d}, \quad \gamma' = \frac{\rho_s - \rho}{\rho}, \quad (4)$$

где ρ_s, ρ – плотность несвязного донного материала и невозмущенной водной среды соответственно; v_* – скорость придонного трения [4, 11].

Подвижность различных фракций донного материала сильно зависит от их размеров [7, 12]. Поэтому гранулометрический состав донного материала играет важную роль в динамике изменений рельефа дна под действием волн и течений. В настоящей работе использованы данные инженерных геологических изысканий в нескольких зонах Керченского канала [32]. В табл.2 представлены процентные распределений основных фракций донного материала по их размерам.

Безразмерный параметр D_* определяется по соотношению:

$$D_* = d(g\gamma' \nu^{-2})^{1/3} = d^{2/3} \left(\frac{v_*^2}{Y \cdot \nu^2} \right)^{1/3}, \quad (5)$$

где ν – молекулярная вязкость, $\nu \approx 1,3 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$.

Для расчета величины W_s необходимо вначале определить средний диаметр d^* взвешенных наносов по формуле:

Т а б л и ц а 2. Процентное содержание фракций донного материала по их размерам и некоторые характеристики.

средний размер d , мм	3,5	1,5	0,75	0,375	0,175	0,075
процентное содержание, %	12,7	25,8	12,5	13,8	31,2	4,1
безразмерный параметр, D_*	67,95	29,12	14,56	7,28	3,40	1,46
гидравлическая крупность взвешенных частиц W_s , м/с	0,18	0,14	0,087	0,046	0,015	0,0028
гидравлическая крупность частиц на поверхности дна W_b , м/с	0,26	0,17	0,096	0,052	0,017	0,0036
показатель степени $m = W_s/\kappa v_*$ в (16)	$0,428v_*^{-1}$	$0,335v_*^{-1}$	$0,207v_*^{-1}$	$0,110v_*^{-1}$	$0,036v_*^{-1}$	$0,007v_*^{-1}$

$$T_0 = \frac{v_*^2}{v_{*cr}^2} - 1; \quad d^* = d(1 - 0,7e^{-0,3T_0}), \quad (6)$$

где $v_{*cr}^2 = gd\gamma'Y_{CR}$ – квадрат динамической скорости, которая соответствует началу движения донного материала.

Экспериментальным путем установлено, что критическое число Шильдса Y_{CR} , соответствующее началу движения частиц донного материала, зависит от безразмерного параметра частицы D_* следующим образом [12]:

$$\begin{aligned} D_* \leq 4 \quad Y_{CR} &= 0,24D_*^{-1}; \quad 4 < D_* \leq 10 \quad Y_{CR} = 0,14D_*^{-0,64}; \\ 10 < D_* \leq 20 \quad Y_{CR} &= 0,04D_*^{-0,1}; \quad 20 < D_* \leq 150 \quad Y_{CR} = 0,013D_*^{0,29}; \\ D_* > 150 \quad Y_{CR} &= 0,055. \end{aligned} \quad (7)$$

Зависимость $W_S = f(d^*)$ имеет следующий вид [12]:

$$\begin{aligned} d^* < 0,1 \text{ мм}, \quad W_S &= \frac{g(d^*)^2\gamma'}{18\nu}, \\ 0,1 \text{ мм} \leq d^* < 1 \text{ мм}, \quad W_S &= \frac{10\nu}{d^*} \left\{ \left[1 + \frac{0,01(d^*)^3 g\gamma'}{\nu^2} \right]^{0,5} - 1 \right\}, \\ d^* \geq 1 \text{ мм}, \quad W_S &= 1,1\sqrt{gd^*\gamma'}. \end{aligned} \quad (8)$$

Для вычисления величины C_B используются различные эмпирические соотношения. В [12] предложена формула

$$C_B = 0,035 \left(\lg \frac{v_* D_*^{0,7}}{W_B} \right)^{3,75}, \quad (9)$$

где W_B – гидравлическая крупность донных наносов, величина которой определяется по соотношению для W_S при $d^* = d$.

В табл.3 приведены результаты расчетов C_B для различных фракций донного материала и величин динамической скорости (скорости трения) v_* .

Одна составляющая процесса переноса донного материала соответствует движению частиц грунта непосредственно вблизи поверхности дна, другая – движению взвешенного материала. Оценки первой составляющей осно-

Т а б л и ц а 3. Концентрация взвешенного вещества вблизи поверхности дна.

средний размер частиц грунта d , мм	3,5	1,5	0,75	0,375	0,175	0,075
процентное содержание, %	12,7	25,8	12,5	13,8	31,2	4,1
$v_* = 0,01$	0	0	0	0	$4,3 \cdot 10^{-5}$	$3,9 \cdot 10^{-3}$
$v_* = 0,015$	0	0	$4,9 \cdot 10^{-10}$	$1,1 \cdot 10^{-6}$	$6,4 \cdot 10^{-4}$	$1,1 \cdot 10^{-2}$
$v_* = 0,02$	$4,4 \cdot 10^{-5}$	$5,2 \cdot 10^{-6}$	$1,8 \cdot 10^{-5}$	$6,7 \cdot 10^{-5}$	$2,0 \cdot 10^{-3}$	$2,0 \cdot 10^{-2}$
$v_* = 0,025$	$2,4 \cdot 10^{-4}$	$7,2 \cdot 10^{-5}$	$1,4 \cdot 10^{-4}$	$3,2 \cdot 10^{-4}$	$4,1 \cdot 10^{-3}$	$3,0 \cdot 10^{-2}$
$v_* = 0,03$	$6,4 \cdot 10^{-4}$	$2,6 \cdot 10^{-4}$	$4,3 \cdot 10^{-4}$	$8,0 \cdot 10^{-4}$	$6,7 \cdot 10^{-3}$	$4,0 \cdot 10^{-2}$
$v_* = 0,035$	$1,3 \cdot 10^{-3}$	$6,0 \cdot 10^{-4}$	$8,9 \cdot 10^{-4}$	$1,5 \cdot 10^{-3}$	$9,8 \cdot 10^{-3}$	$5,0 \cdot 10^{-2}$
$v_* = 0,04$	$2,0 \cdot 10^{-3}$	$1,1 \cdot 10^{-3}$	$1,5 \cdot 10^{-3}$	$2,4 \cdot 10^{-3}$	$1,3 \cdot 10^{-2}$	$6,1 \cdot 10^{-2}$

ваны на эмпирических соотношениях *Van Rijn*, полученных в результате выполнения серии лабораторных экспериментов с несвязным грунтом [7 – 9]. Для расчета второй составляющей транспорта необходим расчет профилей концентрации донного материала $C(z)$. В известных работах по расчетам профилей $C(z)$ используются различные упрощения и эмпирические соотношения [12], так как непосредственные измерения концентрации взвеси достаточно сложны, а ее величина характеризуется значительной изменчивостью. В связи с этим, оценки этой составляющей переноса донного материала имеют значительную неопределенность и могут сильно изменяться при вариации размеров частиц донного материала и параметрах придонных течений. По этой же причине в некоторых современных работах по литодинамике эта составляющая транспорта донного материала вообще не учитывается [20], хотя ее вклад может быть достаточно существенным и, в некоторых случаях, преобладающим.

В настоящей работе для оценки профилей взвешенного донного материала использованы данные мультиспектральных космических съемок морской поверхности. По этим данным определяется концентрация взвеси в приповерхностном слое и, тем самым, существенно повышает точность расчета профилей взвеси и средней концентрации взвеси во всем слое от дна моря до поверхности. Один из таких методов рассмотрен в [33]. Его недостаток состоит в том, что для реализации расчетной схемы необходима атмосферная коррекция данных мультиспектральных оптических спутников в область 0,469; 0,555 мкм. Известно, что для мутных прибрежных вод обычные методы атмосферной коррекции на основе экстраполяции данных из красной, ближней ИК областей спектра в сине-зеленую область сопряжены со значительной неопределенностью [34]. В связи с этим используется рассмотренная выше новая схема расчета концентрации взвеси в Керченском проливе на основе комбинации данных первых двух каналов (0,645 и 0,8585 мкм) оптического сканера *MODIS*. В качестве такой комбинации используется оценка индекса цвета (3) и ее связь с концентрацией взвеси по данным непосредственных измерений.

Общий метод расчета составляющей транспорта взвешенного донного материала основан на решении уравнения для концентрации взвешенных наносов $C(t, z)$:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = W_s \frac{\partial C}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\varepsilon_s}{\sigma_c} \frac{\partial C}{\partial z} \right), \quad (10)$$

где $C(t, z) = (\rho_f - \rho)/(\rho_s - \rho)$ – концентрации взвеси; ρ_f – плотность взвешенного донного материала, кг/м³; ρ_s – плотность несвязного донного материала (как правило, эта величина близкая к 2600 кг/м³); ρ – плотность морской воды (1020 кг/м³); W_s – гидравлическая крупность взвешенных наносов, равная скорости свободного погружения частиц донного материала; ε_s – коэффициент турбулентной диффузии частиц по вертикальной оси z ; $\sigma_c = \text{const} \approx 1$ [14]. Оценки W_s и W_b по методике [12] приведены в табл.2. Общая аппроксимация для зависимостей $W_s = f_1(d)$ и $W_b = f_2(d)$ имеет следующий вид:

$$W_s = -0,0233d^2 + 0,1341d - 0,0049, \quad R^2 = 0,998, \quad (11)$$

$$W_b = -0,0214d^2 + 0,1508d - 0,0061, \quad R^2 = 0,999.$$

Вводя безразмерные параметры времени $t^* = t/T$, вертикальной координаты $z^* = z/H$ и концентрации $c^* = C/C_b$, где C_b – концентрация взвеси у поверхности дна и учитывая, что $\partial c^*/\partial t^* \approx 1$, $\partial c^*/\partial z^* \approx 1$, находим, что масштаб времени T равен

$$T = \frac{H}{W_s + 2\kappa v_*} = \frac{H}{W_s + 2\kappa V C_f}, \quad (12)$$

где $\kappa = 0,42$ – постоянная Кармана; V – скорость течения на верхней границе придонного пограничного слоя (0,2 – 0,5 м/с); $C_f \approx 0,04$ – коэффициент придонного трения.

Для характерной глубины Керченского пролива 7,5 м, $W_s = 0,015$ м/с (преобладающий размер частиц грунта, табл.2), $V = 0,35$ м/с, $T \approx 280$ с. Эта величина намного больше периода поверхностных волн и намного меньше характерного времени изменений рельефа дна, что позволяет использовать стационарное приближение уравнения (10) в следующем виде:

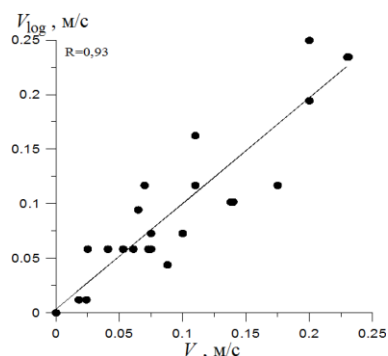
$$\frac{\partial}{\partial z}(\varepsilon_s \frac{\partial C}{\partial z}) + W_s \frac{\partial C}{\partial z} = 0. \quad (13)$$

Для дальнейшего анализа использовано приближение логарифмического пограничного слоя у поверхности дна [35]. Профиль скорости течения в этом слое определяется по соотношению:

$$V(z) = v_*[C_1 \log(zv_*/\nu) + C_2], \quad (14)$$

где v_* – скорость трения.

Соотношение между вычисленной и фактической скоростью течения на верхней границе придонного пограничного слоя в шельфовых зонах Черного моря показано на рис.6. Коэффициент корреляции между этими величинами равен 0,93 и отвечает параметрам $C_1 = 4,272$ и $C_2 = 4,658$. По данным измерений в трубах с гладкими стенками эти параметры находятся в следующих пределах: $5,52 < C_1 < 5,75$, $5,50 < C_2 < 5,84$ для диапазона изменения безразмерной величины v_*H/ν от 50 до 1000. Полученное расхождение в оценке этих параметров примерно на 20 – 25 % объясняется тем, что в рассматриваемом случае для пограничного слоя над морским дном величина v_*H/ν в среднем равна $(4 - 5) \cdot 10^4$, т.е. больше чем на порядок верхнего предела универсального логарифмического профиля для труб. Кроме этого, не учитывались неизвестные неровности дна, которые также влияют на величины параметров C_1 и C_2 .



Минимальное значение $z = z_0$ определяется по соотношению $z_0 = k_z/30$, где k_z – средний размер неоднородностей дна. В случае песчаного дна ($k_z = 0,17$ мм), $z_0 = 5,67 \cdot 10^{-6}$ м, коэффициент придонного трения $C_f = \kappa/\ln(H/z_0)$ при характерных значениях глубины 5 – 10 м

Рис. 6. Сопоставление вычисленной по (14) скорости течения на верхней границе ППС с ее

действительным значением по данным вертикального профилирования. равен 0,031, что соответствует указанным характерным значениям для морских условий. В логарифмическом придонном пограничном слое $\varepsilon_s = \kappa v_* z$, и, следовательно, решение уравнения (7) можно записать следующим образом:

$$C(z) = C_B \left(\frac{z}{z_0} \right)^{W_s / \kappa v_*}, \quad (15)$$

Для вычисления величины C_B используются различные эмпирические соотношения. В [12] предложена формула $C_B = 0,035 (\lg(v_* D_*^{0,7} / W_b))^{3,75}$, где W_b – гидравлическая крупность донных наносов; $D_* = d(g\gamma v_*^{-2})^{0,33}$ – безразмерный параметр.

Интегральное распределение концентрации взвеси C_I в слое глубиной H и удельные переносы q_{VX} , q_{VY} взвешенного донного материала по координатным осям ox , oy равны:

$$C_I = \frac{C_B [H(z_0/H)^m - z_0]}{(1-m)}, \quad q_{VX} = C_I U_X, \quad q_{VY} = C_I U_Y, \quad (16)$$

где U_X , U_Y – средние величины скорости течения по осям ox , oy соответственно; $m = W_s / \kappa v_*$ – показатель степени; $z_0 = dY/6$ – размер неоднородностей на морском дне; $Y = v_*^2 / g d \gamma'$, $\gamma' = (\rho_s - \rho) / \rho$ – число Шильдса.

По данным дистанционного зондирования измеряется интегральная концентрация взвеси, образованная частицами с различными размерами. С учетом приведенных выше соотношений можно записать:

$$C_S = 0,035 \sum_{i=1}^n \left[\lg \left(\frac{v_* \cdot D_*^{0,7}}{W_{bi}} \right) \right]^{3,75} \cdot \alpha_i \cdot \left(\frac{z_{oi}}{H} \right)^{m_i}, \quad (17)$$

где v_* – эффективное значение скорости трения (динамической скорости); α_i – вероятность i -ой фракции донного материала с размером d_i ; n – количество фракций в грунте определенного типа.

Соответственно интегральная концентрация взвеси C_{IS} в слое глубин H удельный перенос взвешенных частиц грунта определяется по соотношениям:

$$C_{IS} = \sum_{i=1}^n C_{Bi} \cdot \frac{[H(z_{oi}/H)^{m_i} - z_{oi}]}{1 - m_i} \cdot \alpha_i; \quad q_{VX} = C_{IS} U_X; \quad q_{VY} = C_{IS} U_Y, \quad (18)$$

где U_X , U_Y – средняя по глубине скорость течения вдоль координатных осей ox , oy .

В соотношениях (17) и (18) неопределенным параметром является скорость трения (динамическая скорость) v_* , которая входит в величины z_{oi} , m_i , C_{Bi} . Функционально она связана с измеряемой величиной C_S , с физической точки зрения эта связь объясняется увеличением концентрации взвеси на морской поверхности при увеличении турбулентных напряжений на дне. Расчеты C_S были выполнены по соотношению (17) для параметров грунта, характерных для Керченского пролива (табл.2). При этом были получены следующие промежуточные аппроксимационные соотношения:

$$C_B = \exp[1,697 \ln d + 6,884] \ln v_* + 4,641 \ln d + 16,823], \\ Z_0 = 0,0106 \cdot v_*^2, \quad m = f(d, v_*) \text{ (табл.2)}. \quad (19)$$

Результирующая зависимость $v_* = f(C_S)$ приведена на рис.7. Как следует из этого рисунка, при изменении концентрации взвеси в диапазоне от 0,1 до 100 г/м³, скорость придонного трения изменяется от 0,0125 до 0,029 м/с. Соответствующая аппроксимация имеет следующий вид:

$$v_* = 0,0165 \cdot C_S^{0,1247}, \quad R^2 = 0,962. \quad (20)$$

Удельный перенос взвешенных частиц грунта C_{IS} был вычислен по соотношению (18) для характерных глубин Керченского пролива. Зависимость $C_{IS} = f(v_*, H)$ представлена на рис.8. Ниже также приведено соответствующее аппроксимационное соотношение:

$$\log C_{IS} = (0,1586 \cdot \ln H + 2,8138) \ln v_* + 0,8813 \cdot \ln H + 6,0132, \quad R^2 = 0,965.$$

Как известно [7 – 12], перенос донного материала осуществляется в двух формах: в виде взвеси, соотношение (12) и в виде движения частиц непосредственно на поверхности дна. Первая форма переноса рассмотрена выше, для второй формы использованы основные соотношения модели Ван-Райна с учетом полученной по данным дистанционных измерений эффективной оценки придонного трения для ансамбля частиц грунта с различными размерами. В соответствии с этой моделью и с учетом различного процентного содержания различных фракций грунта α_i , удельный расход донных наносов C_R , м³·(м·с)⁻¹ и его составляющие по координатным осям равны соответственно:

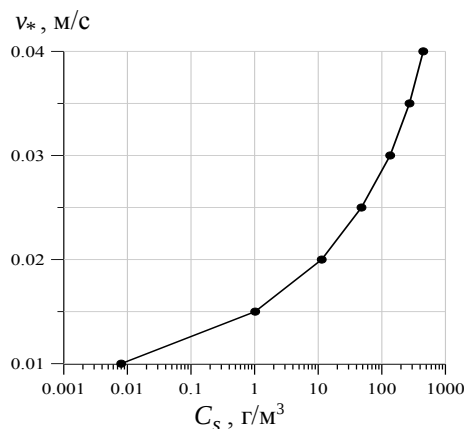
$$C_R = 0,053 \cdot \sum_{i=1}^n \alpha_i \cdot \sqrt{g d_i \gamma'} \cdot \frac{d_i}{D_{*i}^{0,3}} \cdot \left(\frac{v_{*ef,i}^2}{v_{*cr,i}^2} \right)^{2,1},$$

$$q_{RX} = C_R \cdot \sin \alpha_k, \quad q_{RY} = C_R \cdot \cos \alpha_k, \quad (21)$$

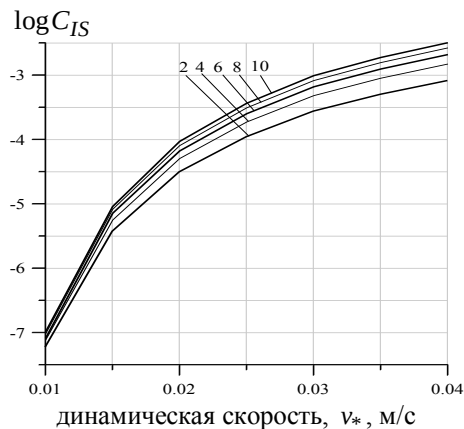
где α_k - курсовой угол распространения поверхностных волн, которые являются основным источником турбулентных напряжений на морском дне; Y_{cr} - критическое число Шильдса, которое определяется из (7).

Расчет эффективной скорости трения v_{*ef} выполняется по следующим формулам [12]:

$$\beta_1 = \frac{v_{*cr}^2 - (v_*)^2}{v_*^2}; \quad \beta_2 = \frac{v_{*cr}^2 + (v_*)^2}{v_*^2};$$



Р и с . 7 . Зависимость эффективной скорости придонного трения от концентрации взвеси на мор-



Р и с . 8 . Зависимость удельного переноса взвешенного донного материала от динамической скорости и глубин

ской поверхности.

(указаны цифрами на графике).

- a) $\beta_1 < 1, \beta_2 < 1, v_{*ef}^2 = \frac{v_{*R}^2}{\pi} (\sqrt{1-\beta_1^2} - \sqrt{1-\beta_2^2} - \beta_1 \arccos \beta_1 + \beta_2 \arccos \beta_2);$
- b) $\beta_1 < 1, \beta_2 > 1, v_{*ef}^2 = \frac{v_{*R}^2}{\pi} (\sqrt{1-\beta_1^2} - \beta_1 \arccos \beta_1);$
- c) $\beta_1 > 1, v_{*ef}^2 = 0;$
- d) $\beta_1 < -1, v_{*ef}^2 = (v_*)^2 - v_{*cr}^2.$

(22)

Зависимость параметра $\log C_R$ от динамической скорости v_* была вычислена для условий Керченского пролива и ниже приведено полученное эмпирическое соотношение:

$$\log C_R = 3,1016 \cdot \ln v_* + 5,4415, \quad R^2 = 0,9941. \quad (23)$$

Для расчетов динамики донного рельефа используется следующее уравнение:

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\rho_p}{\rho_s} \left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} \right) = \frac{1}{1-n} \left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} \right), \quad (24)$$

где $q_x = q_{VX} + q_{RX}$, $q_y = q_{VY} + q_{RY}$ – составляющие удельного транспорта донных наносов вдоль координатных осей ox , oy ; ρ_p – плотность частиц в донных отложениях; n – пористость грунта, равная примерно 0,4. При увеличении расхода донного материала $\partial q_x / \partial x > 0$, $\partial q_y / \partial y > 0$ глубина увеличивается вследствие размыва грунта и, наоборот, при $\partial q_x / \partial x < 0$, $\partial q_y / \partial y < 0$ глубина уменьшается из-за аккумуляции донного материала.

Практическая реализация численного метода. Первым шагом к реализации численного метода расчета динамики изменений рельефа дна в Керченском проливе является формирование общей сетки координат, которая используется в расчетах. Пространственное разрешение (расстояние между узлами) соответствует максимальному разрешению оптических сканеров системы MODIS, т.е. 250 м. Регулярное использование данных спутника более высокого разрешения Landsat связано со следующей проблемой. Относительно редкие пролеты над исследуемой территорией – один раз за 16 сутки и малая вероятность безоблачного неба в эти моменты времени, относительно небольшая площадь охвата пространственной съемки – около 180 км. Поэтому в качестве основного источника данных для расчетов динамики рельефа дна в Керченском проливе используются данные оптических сканеров системы MODIS с указанным разрешением.

В качестве расчетной сетки используется приведенное на рис.9 распределение глубин в Керченском проливе. Координаты: 45,14 – 45,44° с.ш., 134 пикселя; 36,40 – 37,00° в.д., 187 пикселей.

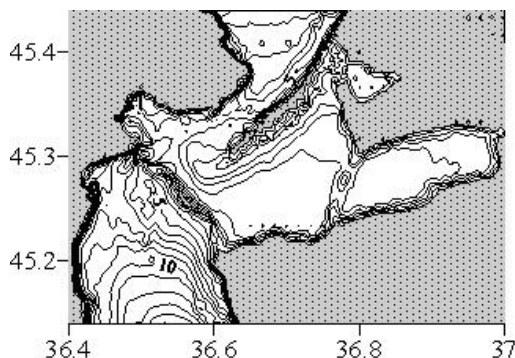


Рис. 9. Распределение глубин в Керченском проливе на базовой расчет-

ной сетке, пространственное разрешение 250 м.

Исходными данными для выполнения численных расчетов являются:

1. Поля скорости ветра, полученные с дискретностью 2 – 3 ч. Они используются для расчетов пространственных распределений скорости течения и характеристик поверхностных волн.

2. Распределения яркости $L_t(0,645)$, $L_t(0,8585)$, измеренной фотометром оптического сканера *MODIS (Aqua/Terra)* на длинах волн 0,645 и 0,8585 мкм с максимальным пространственным разрешением 250 м.

3. Гранулометрические данные по составу донного материала, т.е. процентное распределение фракций грунта по их размерам.

Общая структурная схема расчета характеристик динамики рельефа дна в Керченском проливе приведена на рис.10.

Последовательные данные о поле ветра используются совместно с данными о рельефе дна для численных расчетов нестационарного поля поверхностных волн и поля течений. Пространственные распределения значительных высот волн, их периодов и длин определяются при помощи численной модели третьего поколения *SWAN (Simulating Waves Nearshore)* [36, 37].

Численные расчеты характеристик поверхностных волн проводились на трех сетках (рис.11) методом вложенных сеток для различных ветровых ситуаций. Размеры расчетных сеток выбирались исходя из параметров решаемых задач (расчет течений и донных переносов в Керченском проливе) и технических возможностей вычислительной машины.

В качестве иллюстрации ниже приведены данные для ситуации с относительно большой скоростью ветра (29 марта 2008 г.). Были использованы данные *SKIRON* [38] Эти распределения скорости ветра приведены на рис.12.

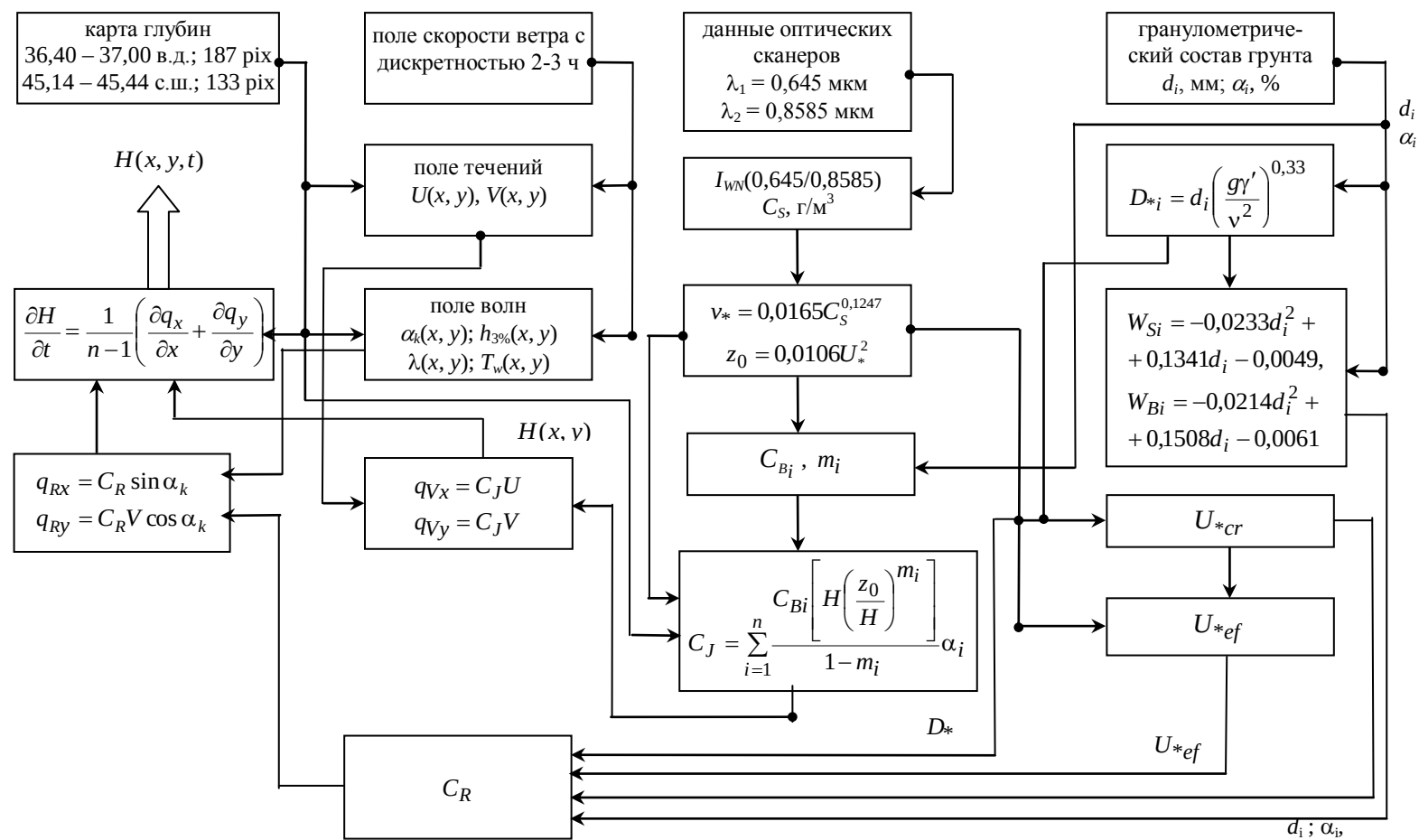
В качестве граничных условий на грубой сетке задавались начальная высота значительных высот волн h_{s0} , средний период T_{m0} и пиковое направление волн θ_{p0} вдоль наветренной границы бассейна. Для вложенных сеток 1 и 2 в качестве граничных условий задавались рассчитанные на грубой сетке спектры волнений на жидких границах областей.

Расчет выполнялся для 24 ч реального времени, при этом шаг по времени принимался равным двум часам, что обуславливалось периодом исходных данных о поле ветра.

Разрешение по угловому спектру во всех случаях составляет $\Delta\theta = 6^\circ$, разрешение по частотному спектру составляло 31 узел, а минимальная частота волн принималась равной 0,05 Гц. Результаты расчетов значительных высот волн для этих случаев приведены на рис.13 – 15 [39].

Для расчета течений в Керченском проливе используется численная модель [40, 41]. Это модель основана на линейной теории установившихся течений в однородной жидкости без горизонтального обмена количеством движения (модель В.Экмана – А.И.Фельзенбаума), обобщенная на случай учета внутреннего трения, пропорционального скорости течения. В этой модели трехмерная задача сводится к решению двумерного эллиптического уравнения с переменными коэффициентами (зависящими, в частности, от рельефа дна) для интегральной функции тока (задача Дирихле) и к последующему расчету по аналитическим формулам трех составляющих скорости течения.

Характерный пример расчета средних по глубине течений в Керченском проливе приведен на рис.16. Видно, как под действием северо-восточного вет-



Р и с . 1 0 . Общая структурная схема расчета рельефа дна в Керченском проливе.

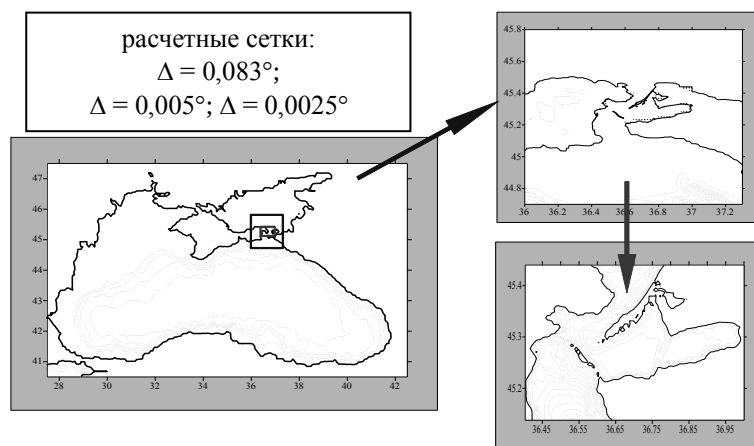


Рис. 11. Схема расчета характеристик поверхностных волн в Керченском проливе методом вложенных сеток.

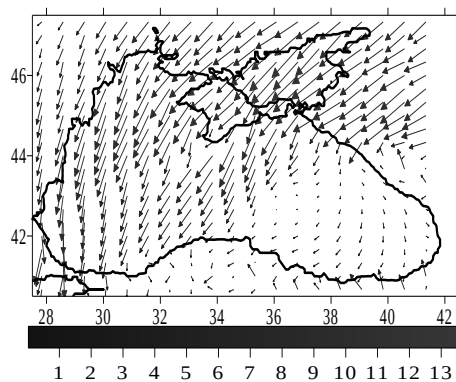


Рис. 12. Поле скорости ветра 29 марта 2008 г.

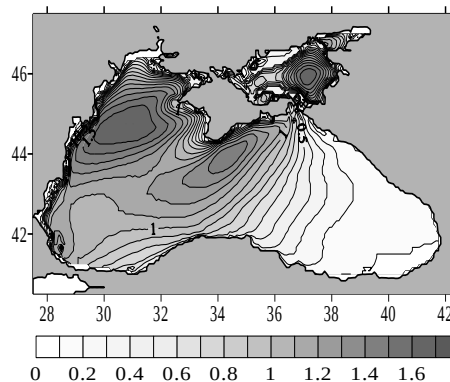


Рис. 13. Высоты волн 3 % обеспеченности 29 марта 2008 г.

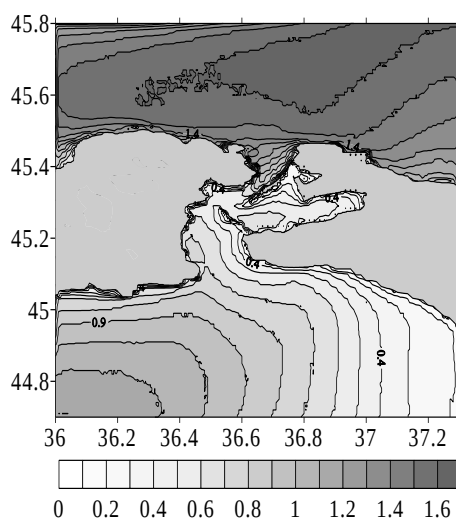


Рис. 14. Высоты волн 3 % обеспеченности во второй области расчетной сетки.

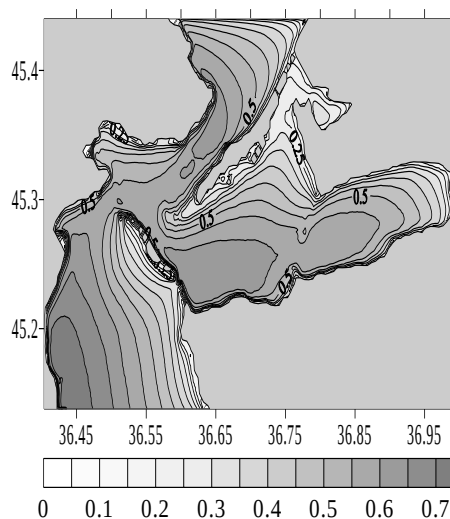


Рис. 15. Высоты волн 3 % обеспеченности в Керченском проливе.

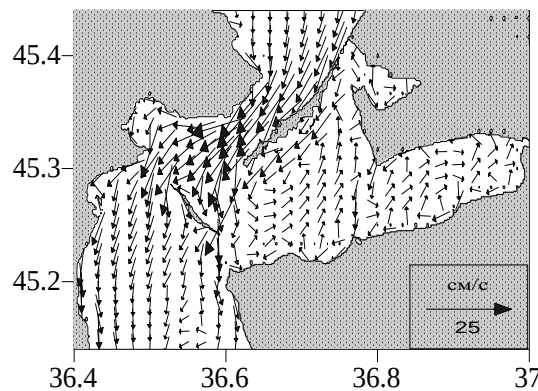


Рис. 16. Пространственное распределение осредненной по глубине скорости течения в Керченском проливе при скорости ветра 9,4 м/с.

ра формируется интенсивный поток между о.Коса Тузла и западным берегом пролива, а также циклональная циркуляция в области между косой Чушка, о.Коса Тузла и восточным берегом пролива. Это поле течений характеризуется относительно небольшими скоростями порядка нескольких см/с.

Данные оптического сканера *MODIS (Terra & Aqua)* с пространственным разрешением 250 м использованы для расчета индекса цвета в красной и ближней ИК областях спектра ($I_{wn}(0,645/0,8585)$) по соотношению (3). Эти данные пересчитываются в концентрацию взвеси на морской поверхности $C_s = 1,3326 \cdot \exp(0,3194 I_{wn})$ и в динамическую скорость на поверхности дна $v_* = 0,0165 C_s^{0,1247}$, которая используется в дальнейших расчетах. Характерные примеры пространственных распределений этих параметров приведены на рис.17 и 18 соответственно. Видно, что основные особенности пространственной структуры индекса цвета и динамической скорости определяются структурой рельефа дна в Керченском проливе: максимальные значения I_{wn} и v_* концентрируются в области между о.Коса Тузла и западным берегом, а также в зоне циклональной циркуляции южнее косы Чушка.

Результаты. Для анализа динамики рельефа дна в Керченском проливе были использованы характерные данные девяти съемок оптическим сканером *MODIS (Terra & Aqua)*. Эти данные были получены в безоблачные дни при различном направлении скорости ветра, которая изменялась в диапазоне от 2,0 до 11,5 м/с. Так как концентрации взвеси при этих условиях изменялась в широком диапазоне, полученные пространственные распределения $C_s = f(x, y)$ были нормированы на средние значения $\langle C_s \rangle = 1,4327 W^{0,4059}$, зависящие от скорости ветра.

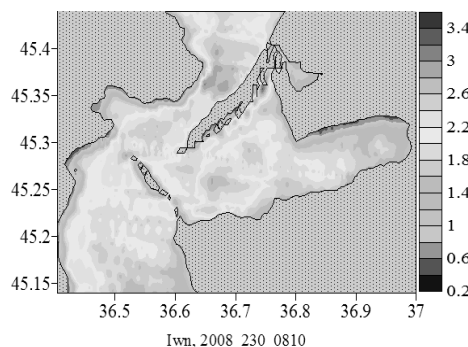


Рис. 17. Пространственное распределение индекса цвета в Керченском проливе по данным съемки 2008 г., 230 день, 8:10.

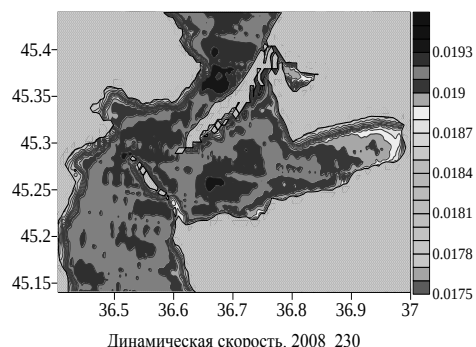


Рис. 18. Пространственное распределение скорости придонного трения, м/с.

Т а б л и ц а 4. Характеристики космических съемок акватории Керченского пролива.

№ п/п	дата и время	скорость ветра, м/с	направление ветра	параметр нормировки $\langle C_S \rangle = 1,4327W^{0,4059}$
1	2008 г., 89 день, 8:40	11,5	северо-восток	3,86
2	2008 г., 89 день, 10:25	11,5	северо-восток	3,86
3	2008 г., 230 день, 8:10	2,0	северо-восток	1,89
4	2008 г., 279 день, 9:00	3,5	юго-восток	2,38
5	2009 г., 102 день, 8:00	9,4	северо-восток	3,56
6	2009 г., 141 день, 8:30	8,8	северо-восток	3,46
7	2009 г., 143 день, 8:15	3,5	юг	2,38
8	2009 г., 286 день, 9:10	5,0	юго-восток	2,75
9	2010 г., 126 день, 8:25	3,0	северо-запад	2,24

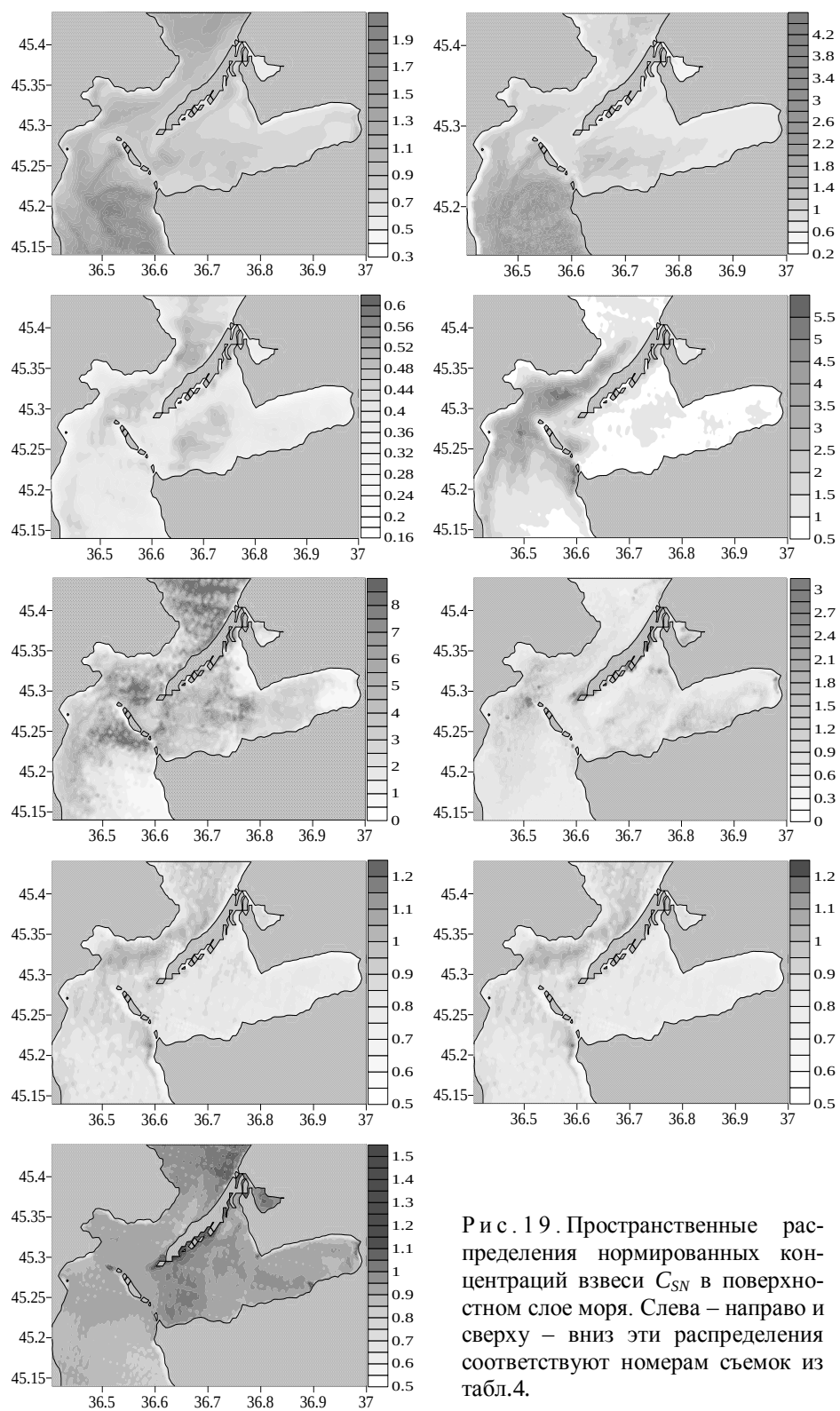
Данные о характеристиках этих съемок приведены в табл.4. Соответствующие распределения величин $C_S/(1,4327W^{0,4059}) = C_{SN}$ приведены на рис.19.

Пространственная структура большинства этих распределений имеет многие совпадающие особенности, а именно увеличение концентрации взвеси в зоне между о.Коса Тузла и западным берегом пролива, в некоторых случаях такое увеличение происходит южнее этого острова. Для оценки количественных связей между указанными пространственными распределениями концентрации взвеси были вычислены соответствующие величины коэффициентов корреляции. С этой целью использовано свыше 25000 отсчетов для каждой космической съемки. Эти коэффициенты корреляции представлены в виде матрицы, представленной ниже в виде табл.5.

За исключением одной комбинации (съемки 2 – 7) из 36-ти рассмотренных, остальные коэффициенты корреляции значительно превышали уровень достоверности выборочной оценки (среднее значение $R = 0,61$). Это позволяет использовать параметризацию нормированного пространственного распределения взвеси в зависимости от средней скорости ветра и тем самым исключить влияние облачности на расчеты динамики рельефа дна в Керченском проливе. Для этого использован статистический метод максимального

Т а б л и ц а 5. Матрица коэффициентов корреляции для съемок 1 – 9.

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1,0	0,59	0,73	0,65	0,74	0,85	0,53	0,86	0,79
2	0,59	1,0	0,59	0,42	0,41	0,49	0,19	0,61	0,40
3	0,73	0,59	1,0	0,65	0,74	0,85	0,53	0,86	0,39
4	0,65	0,42	0,65	1,0	0,62	0,55	0,40	0,62	0,39
5	0,74	0,41	0,74	0,62	1,0	0,72	0,41	0,77	0,62
6	0,85	0,49	0,85	0,55	0,72	1,0	0,67	0,84	0,82
7	0,53	0,19	0,53	0,40	0,41	0,67	1,0	0,43	0,61
8	0,86	0,61	0,86	0,62	0,77	0,84	0,43	1,0	0,72
9	0,79	0,40	0,39	0,39	0,62	0,82	0,61	0,72	1,0



Р и с . 1 9 . Пространственные распределения нормированных концентраций взвеси C_{SN} в поверхностном слое моря. Слева – направо и сверху – вниз эти распределения соответствуют номерам съемок из табл.4.

правдоподобия [31]. Функция правдоподобия записывается следующим образом:

$$L[C_{SN1}(x, y), C_{SN2}(x, y) \dots C_{SNj}(x, y); C_P(x, y)] = \prod_{i=1}^j p(C_{SNi}, C_{SN2} \dots C_{SNj}; C_P), \quad (25)$$

где $p(C_{SNi}; C_P) = (\sqrt{2\pi}\sigma)^{-1} \cdot \exp((C_{SNi} - C_P)/(\sqrt{2}\sigma))^2$ – плотность распределения отклонений $\Delta_i = C_{SNi} - C_P$ в каждой точке с координатами x, y ; $C_P(x, y)$ – параметрическое пространственное распределение нормированной концентрации взвеси.

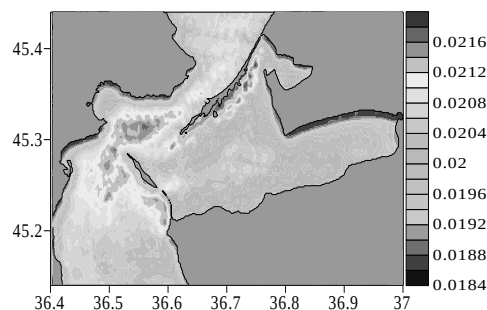
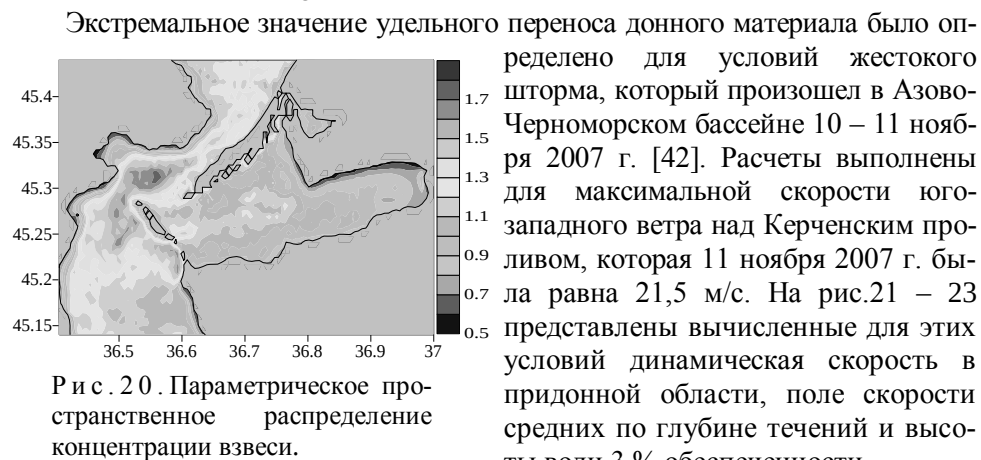
Уравнение правдоподобия и его решение для рассматриваемого случая имеют следующий вид:

$$\frac{\partial \ln L}{\partial C_P} = 0, \quad C_P(x, y) = \frac{1}{j} \sum_{i=1}^j C_{SNi}(x, y). \quad (26)$$

Пространственное распределение параметрической концентрации взвеси представлено на рис.20. Видно, что это распределение отражает основные (наиболее типичные) особенности отдельных распределений, представленных на рис.19.

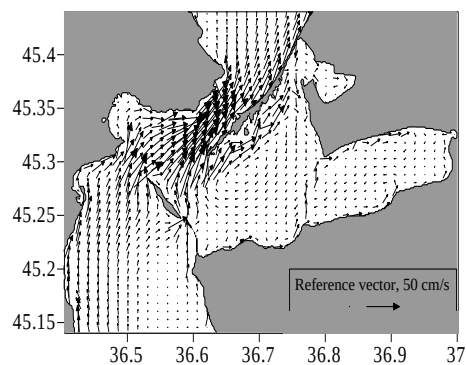
Расчет пространственного распределения концентрации взвеси при скорости ветра W выполняется по соотношению:

$$C_S(x, y) = 1,4327 \cdot W^{0,4059} \cdot C_P(x, y). \quad (27)$$

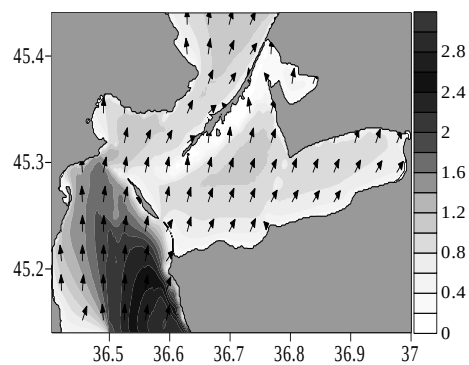


Экстремальное значение удельного переноса донного материала было определено для условий жестокого шторма, который произошел в Азово-Черноморском бассейне 10 – 11 ноября 2007 г. [42]. Расчеты выполнены для максимальной скорости юго-западного ветра над Керченским проливом, которая 11 ноября 2007 г. была равна 21,5 м/с. На рис.21 – 23 представлены вычисленные для этих условий динамическая скорость в придонной области, поле скорости средних по глубине течений и высоты волн 3 % обеспеченности.

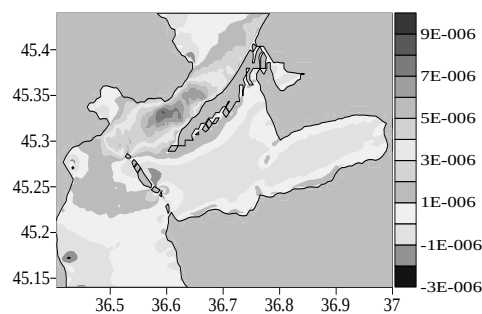
Представленная выше методика была использована для расчета удельных переносов донного материала вдоль параллели (рис.24) и меридиана (рис.25). При пересчете в эквивалентный перенос массы, максимальные величины составляют 14 – 15 г/(с·м). Зоны максимальных переносов донного материала находятся в узкой части пролива между косой Чушка и западным берегом пролива, а также вблизи берегов о.Коса Тузла.



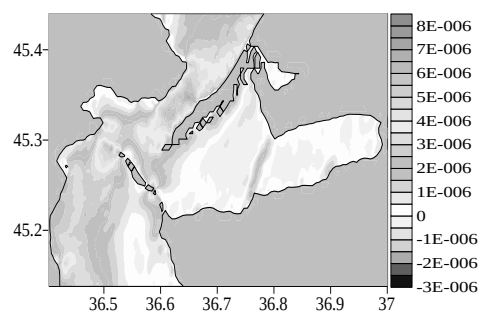
Р и с . 2 2 . Поле течений 11 ноября 2007 г.



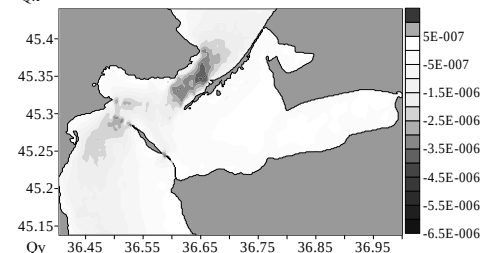
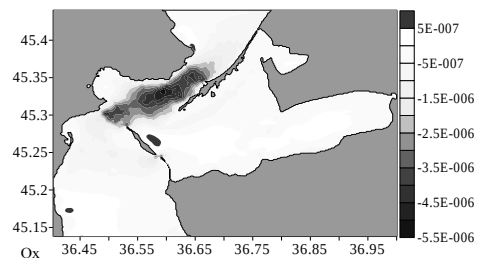
Р и с . 2 3 . Высоты волн 3 % обеспеченности, м, 11 ноября 2007 г.



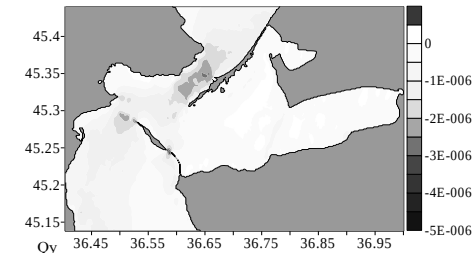
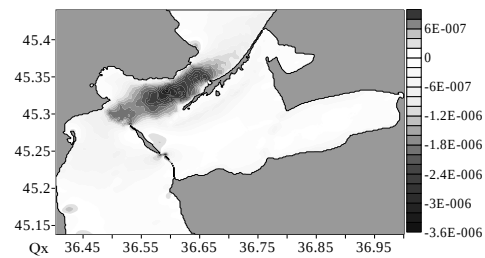
Р и с . 2 4 . Удельный перенос донного материала вдоль параллели Q_x , $\text{м}^3/(\text{с} \cdot \text{м})$



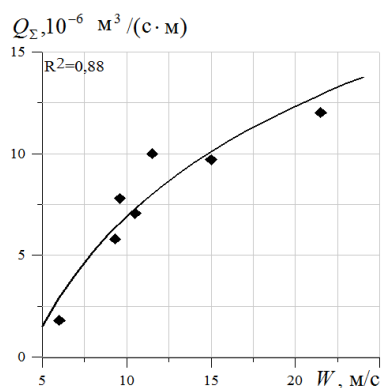
Р и с . 2 5 . Удельный перенос донного материала вдоль меридиана Q_y , $\text{м}^3/(\text{с} \cdot \text{м})$



Р и с . 2 6 . Удельный перенос донного материала вдоль параллели Q_x , $\text{м}^3/(\text{с} \cdot \text{м})$ и вдоль меридиана Q_y , $\text{м}^3/(\text{с} \cdot \text{м})$ по данным космической съемки 12 апреля 2009 г. Скорость ветра 9,6 м/с.



Р и с . 2 7 . Удельный перенос донного материала вдоль параллели Q_x , $\text{м}^3/(\text{с} \cdot \text{м})$ и вдоль меридиана Q_y , $\text{м}^3/(\text{с} \cdot \text{м})$ по данным космической съемки 21 мая 2009 г. Скорость ветра 9,3 м/с.



Р и с . 2 8 . Зависимость суммарного удельного переноса донного материала от скорости ветра.

В условиях действия ветра с указанной скоростью в течение 3 – 4 ч, удельные перенос донного материала составляет 150 – 210 кг/м. Аналогичные расчеты были выполнены для других скоростей ветра. Некоторые пространственные распределения удельных переносов донного материала показаны ниже на рис.26 и 27.

Расчеты были выполнены для семи ветровых режимов при скоростях ветра от 7 до 21,5 м/с. Зависимость суммарного удельного переноса донного материала от скорости ветра представлена на рис.28. Соответствующая аппроксимация имеет следующий вид:

$$Q_\Sigma = 6,6607 \cdot \ln W - 7,8703, \quad R^2 = 0,87. \quad (28)$$

Рассматриваемые пространственные масштабы в настоящей работе составляют 150 – 300 м. Оценки максимальной изменчивости рельефа дна в области наибольших переносов донного материала в узкой зоне Керченского пролива (рис.24 и 25) составляют на таких масштабах примерно 0,5 мм при действии ветра со скоростью 21,5 м/с в течение суток. Аналогичные оценки вблизи оконечностей о.Коса Тузла и вдоль береговой линии дают величины примерно на порядок больше, т.е. около 1 см. Это дает основание считать, что основные изменения рельефа дна носят локальный характер и проявляются на значительно меньших масштабах.

Обсуждение и выводы. При изучении литодинамических процессов в Керченском проливе необходимо учитывать сложную конфигурацию береговой линии и рельефа дна, гранулометрический состав донного материала, относительно высокую мутность водной среды, которая сильно зависит от волнения и течений, т.е. определяется, главным образом, скоростью ветра. К числу важных региональных особенностей Керченского пролива относятся также близость глубоководных районов Черного моря с относительно прозрачной водой. Все эти факторы учтены в настоящей работе для создания метода оперативного мониторинга зон наибольшей активности литодинамических процессов на основе данных космических съемок оптическими сканерами, на примере использования системы спутников *MODIS* с максимально возможным пространственным разрешением 250 м.

Хорошо известно, что атмосферная коррекция оптических съемок мутных прибрежных вод из космоса представляет собой сложную и пока нерешенную проблему. Использование различных алгоритмов может приводить к противоречивым результатам [29, 34]. В связи с этим, в настоящей работе предложен и реализован новый подход. В его основе лежит предположение о том, что масштабы атмосферного аэрозоля превышают расстояние от Керченского пролива до границы прозрачных вод Черного моря, т.е. несколько десятков километров. При обосновании этой гипотезы использованы результаты анализа данных проекта *AERONET*, обработанных в Морском гидрофизическом институте НАНУ. Анализ показал, что пространст-

венная изменчивость аэрозоля над Азово-черноморским бассейном определяется, главным образом, крупномасштабной адвекцией воздушных масс, в силу чего характерный пространственный масштаб аэрозольных образований равен 1000 км [43, 44]. Так как сигналы яркости восходящего излучения от прозрачной воды на длинах волн 0,645 и 0,8585 мкм пренебрежимо малы, измеренные фотометром спутника величины для прозрачных вод можно считать сигналами яркости аэрозольного и релеевского рассеяния в атмосфере, а сигналы яркости восходящего излучения для зоны мутных вод Керченского пролива – суммой сигналов этого же атмосферного рассеяния и обратного рассеяния взвесью мутных прибрежных вод. Таким образом, атмосферная коррекция оптических съемок Керченского пролива представляет собой вычисление разности измеренных фотометром сигналов и их минимальных значений, относящихся к прозрачным водам Черного моря. В качестве информативного параметра для расчета концентрации взвеси использован индекс цвета $I_{wn}(0,645/0,8585)$, т.е. отношение нормализованной яркости в двух спектральных участках 0,645 и 0,8585 мкм. Сопоставление этой величины с концентрацией взвеси C_S показало, что при различных условиях прямых измерений концентрации взвеси наблюдаются устойчивая связь этих величин с коэффициентом корреляции более 0,9 (рис.2).

Другой особенностью настоящей работы является обоснование и получение соответствующих соотношений для взаимосвязи концентрации взвеси на поверхности моря и турбулентных напряжений в придонной области, под действием которых происходит формирование профилей концентрации частиц донного материала с различными размерами. В известных работах по литодинамике турбулентные напряжения в придонной области определяют на основе различных эмпирических соотношений в зависимости от характеристик волнового поля и/или поля течений, пространственные масштабы которых могут не соответствовать масштабам турбулентных напряжений вблизи дна. Кроме этого различные эмпирические соотношения получены для различных условий и часто их значения могут существенно различаться для одних и тех же исходных данных. В отличие от указанного традиционного подхода, в настоящей работе использованы данные космических съемок для измерений концентрации взвеси, так как именно эта величина непосредственно обусловлена турбулентными напряжениями в придонной области, а ее пространственное распределение соответствует масштабам турбулентных напряжений вблизи дна.

К числу особенностей настоящей работы относится параметризация пространственного распределения концентрации взвеси, в основе которой лежит высокая корреляция нормированных пространственных распределений этих величин, полученных по данным космических съемок при различных условиях ветрового режима. Скорость ветра рассматривается в качестве основного фактора, определяющего пространственную структуру концентрации взвеси. Параметрическое пространственное распределение концентрации взвеси (рис.20) вычислено на основе статистического метода максимального правдоподобия и в первом, рассматриваемом приближении, зависит только от скорости ветра. При этом становится возможным вычисление удельного переноса донного материала вне зависимости от облачно-

сти, но с учетом скорости ветра, как основного фактора, определяющего параметры литодинамических процессов в Керченском проливе. Для оценки достоверности получаемых таким образом результатов использованы данные из [31], где для условий Азовского моря представлена зависимость максимальной глубины видимости белого диска Z_d от скорости ветра W , т.е. $Z_d = 10,814W^{-0,7224}$. Учитывая взаимосвязь концентрации взвеси и глубины видимости белого диска ($C_S = 13,56Z_d^{-1,33}$), находим, что при скорости ветра 21,5 м/с максимальная концентрация взвеси равна 10,89 г/м³. С другой стороны, максимальное значение этой же величины, вычисленное по параметрическому пространственному распределению концентрации взвеси, равно $C_{S,max} = 1,4327 \cdot W^{0,4059} C_{P,max}$ (28) и при $W = 21,5$ м/с, $C_{P,max} = 1,9$ (рис.20) равно 9,45 г/м³. Относительное расхождение этих величин составляет 13,5 %, что, вероятно, характеризует точность оценок концентрации взвеси.

Результаты выполненных расчетов являются основой для следующих выводов.

1. Данные измерений оптических сканеров в красной области спектра традиционно используются для определения концентрации взвеси. При этом показания фотометра в значительной мере зависят от зенитных и азимутальных углов спутника и Солнца, сигналов атмосферного рассеяния и прочих внешних факторов. Полученные данные не связаны с профилями взмученного донного материала и с турбулентными напряжениями вблизи поверхности дна, и, следовательно, нет возможности их использования для оперативного мониторинга литодинамических процессов. В настоящей работе обоснованы следующие методы решения этих проблем. 1. В качестве основного информативного параметра используется индекс цвета в виде отношения нормированной яркости в двух спектральных участках: 0,645 и 0,8585 мкм. Это позволяет практически исключить влияние указанных внешних факторов. 2. Вычислены вертикальные профили концентрации частиц донного грунта с различными характерными размерами, определены концентрации частиц на поверхности моря, которые непосредственно связаны с данными оптических сканеров. Таким образом, определена связь показаний фотометра спутника с турбулентными напряжениями вблизи дна и, следовательно, с основными параметрами литодинамических процессов.

2. Поле концентрации взвеси на акватории Керченского пролива формируется преимущественно мелкими частицами донного материала с характерными размерами 0,175 и 0,075 мм. Вертикальные профили концентрации соответствуют степенной зависимости, которая определяется балансом скорости подъема частиц под действием турбулентных напряжений и оседания под действием собственного веса. Концентрация более крупных частиц (0,375 – 3,5 мм) быстро уменьшается при увеличении расстояния от поверхности дна, а вероятность их появления на морской поверхности ничтожно мала.

3. Пространственное распределение концентрации взвеси, которое отражает структуру турбулентных напряжений в придонной области, характеризуется рядом хорошо выраженных региональных особенностей, а именно локальным увеличением концентрации в узкой области пролива между косой Чушка и западным берегом, вблизи юго-западного берега о.Коса Тузла, а также вблизи западной и восточной оконечностей этого острова. Простран-

ственные контрасты концентрации определяются, главным образом, скоростью ветра. Эта особенность служит основой для расчета наиболее вероятного распределения нормированных величин концентрации взвеси, которые определяются скоростью ветра и, следовательно, исключают влияние облачности на мониторинг литодинамических процессов в Керченском проливе.

4. В качестве экстремальной ветровой ситуации в Керченском проливе рассмотрены штормовые условия 11 ноября 2007 г., когда возникла аварийная ситуация с большим числом судов. Максимальная скорость ветра по данным системы *SKIRON* достигала 21,5 м/с. Выполненные расчеты показали, что удельный перенос донного материала при этих условиях достигает $1,2 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/(\text{м} \cdot \text{с})$ или 19,2 г/(м·с). При действии ветра с такой скоростью в течении четырех часов, удельный перенос составил 0,173 м³ или 277 кг на один м фронта переноса донного материала.

5. Расчеты удельного переноса донного материала $Q_{\Sigma} = \sqrt{Q_x^2 + Q_y^2}$, выполненные для скоростей ветра от 6 до 21,5 м/с показали хорошо выраженную логарифмическую зависимость $Q_{\Sigma} = f(W)$ с показателем достоверности $R^2 = 0,88$. Это позволяет использовать данные о скорости ветра для оперативного мониторинга литодинамических процессов в Керченском проливе.

Авторы выражают искреннюю признательность С.В.Бердникову (ЮНЦ РАН) за предоставленные данные прямых измерений концентрации взвеси и глубины видимости белого диска в Керченском проливе, Н.Б.Шапиро и Ю.Н.Рябцеву за возможность использования разработанной ими численной модели поля течений в проливе, Л.А.Петренко за выполнение большого числа расчетов по этой модели и М.В.Шокурову за представленные данные о поле ветра.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Спиридонова Е.О.* Оценка влияния гидрометеорологических факторов на распределение донных осадков в Керченской бухте // Системы контроля окружающей среды.– Севастополь, 2007.– С.235-239.
2. *Ломакин П.Д., Спиридонова Е.О., Чепыженко А.И. и др.* Антропогенные и природные источники взвешенного вещества в водах Керченского пролива // Морской экологический журнал.– 2008.– т.7, № 4.– С.51-59.
3. *Кушнир В.М., Морозов А.Н., Федоров С.В., Петренко Л.А.* Воздействие волн и течений на о.Коса Тузла по данным дистанционного зондирования для оценки эрозии и аккумуляции донного материала в Керченском проливе // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.– Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2009.– вып.19.– С.124-142.
4. *Прандтль Л.* Гидроаэромеханика.– М.: Иностранная литература, 1949.– 520 с.
5. *Engelund F., Fredsoe J.* A sediment transport model for straight alluvial channels // Nordic Hydrol.– 1976.– 7.– P.293-306.
6. *Breuserd H., Nicolet G., Shen H.U.* Local scour around cylindrical piers // J. Hydraulics Research.– 1977.– v.15, № 3.– P.211-252.
7. *Van Rijn L.C.* Sediment transport. Part 1: Bedload Transport // J. Hydraul. Eng.– 1984.– v.110, № 10.– P.1431-1456.
8. *Van Rijn L.C.* Sediment transport. Part 3: Suspended load transport // J. Hydraul. Eng.– 1984.– v.110, № 11.– P.1631-1641.

9. *Van Rijn L.C.* Mathematical modeling of suspended sediment in nonuniform flows // *J. Hydr. Engrg.*— 1986.— v.112, № 6.— P.433-455.
10. *Михинов А.Е.* Баланс энергии возмущенного движения в русловых потоках // *Метеорология и гидрология.*— 1987.— 9.— С.86-95.
11. *Breusers H., Raudkivi A.* Scouring.— Rotterdam: A.A. Balkema, 1991.— 143 p.
12. *Иванов В.А., Михинов А.Е.* Прогноз динамики наносов в прибрежных зонах моря (Практические рекомендации и примеры) / Препринт. — Севастополь: МГИ НАН Украины, 1991.— 52 с.
13. *Tolman H.L.* Wind waves and movable-bed bottom friction // *J. Phys. Oceanogr.*— 1994.— 24.— P.994-1009.
14. *Hsu T.-W.* Application of a k- ϵ model to instantaneous sediment concentration and turbulent boundary layers of wave-induced shelf flow // *Flow modeling and turbulent measurements VII (October 5-8 1998, Taiwan).*— Taiwan, 1998.— P.27-37.
15. *Rankin K.L., Hires R.I.* Laboratory measurement of bottom shear stress on a movable bed // *J. Geophys. Res.*—2000.— v.105, C7.— P.17011-17019.
16. *Li F., Cheng L.* Numerical simulation of pipeline local scour with les-wake effects // *Offshore and Polar Engineering.*— 2000.— v.10, № 3.— P.195-199.
17. *Добровровский А.Н., Дружевский С.А., Кушнир В.М., Петренко Л.А.* Диагностическая модель деформаций дна под действием гидрометеорологических факторов // *Навигация и гидрография.*— 2001.— 1.— С.94-103.
18. *Добровровский А.Н., Дружевский С.А., Кушнир В.М., Петренко Л.А.* Математическое моделирование деформаций дна под воздействием гидрометеорологических факторов // VI Росс. научно-техн. конф. «Современное состояние и проблемы навигации и океанографии», НО-2007 (23-25 мая 2007 г., С.-Петербург).— Четвертая Российская научно-техническая конф. «Современное состояние, проблемы навигации и океанографии (НО-2001)» (6-9 июля 2001, С.-Петербург).— С.-Пб.: ГосНИНГИ МО РФ, 2001.— том 2.— С.293-298.
19. *Lia Y., Xu Y., Wang S.S.Y.* Numerical simulation of local scouring around a cylindrical pier / *Proc. of the First Intern. Conf. on Scour of Foundations (Nov. 17-20, 2002, Texas).*— A&M University, College Station, Texas, USA, 2002.— P.1181-1187.
20. *Roulund A., Sumer B.M., Fredsoe J., Michelsen J.* Numerical and experimental investigation of flow and scour around a circular pile // *J. Fluid Mech.*— 2005.— 534.— P.351-401.
21. *Фомин В.В., Иванов В.А.* Объединенная численная модель течений, волнения и транспорта наносов озера Донузлав // *Морской гидрофизический журнал.*— 2006.— 2.— С.43-65.
22. *Link O., Zanke U.* On the prediction of the maximum depth of a scour hole around cylindrical bridge piers in non cohesive soils // *Proc. of the First Intern. Conf. on Scour of Foundations (Nov. 17-20, 2002, Texas).*— A&M University, College Station, Texas, USA, 2002.— P.1160-1165.
23. *Anglin C.D., Itamunoala F., Millen G.* Riprap as permanent scour protection around bridge piers // *Proc. of the the First International Conf. on Scour of Foundations (Nov. 17-20, 2002, Texas).*— A&M University, College Station, Texas, USA, 2002.— P.582-596.
24. *Ланпо Д.Д., Стрекалов С.С., Завьялов В.К.* Нагрузки и воздействие ветровых волн на гидротехнические сооружения.— Л.: Изд-во «ВНИИ гидротехники им. Б.Е.Веденеева», 1990.— 432 с.
25. *Bos K.J., Verheij H.J., Kant G., Kruisbrink A.C.H.* Scour protection around gravity based structures using small size rock // *Proc. of the First Intern. Conf. on Scour of*

- Foundations (Nov. 17-20, 2002, Texas).– A&M University, College Station, Texas, USA, 2002.– P.567-582.
26. *Van Oord* Scour prediction event ICSF-1 // Proc. of the First Intern. Conf. on Scour of Foundations (Nov. 17-20, 2002, Texas).– A&M University, College Station, Texas, USA, 2002.– P.1-11.
 27. *Кушнир В.М., Душко В.Р., Федоров С.В., Благовидов Л.Б., Жемойдо Ю.Г.* Расчет воздействия морской среды на океанотехнические установки // Морские испытания.– 2007.– 3.– С.32-41.
 28. *Кушнир В.М., Федоров С.В., Душко В.Р., Благовидов Л.Б., Жемойдо Ю.Г.* Оперативный контроль гидродинамических нагрузок на морские океанотехнические системы по данным спутниковых измерений // VI Росс. научно-техн. конф. «Современное состояние и проблемы навигации и океанографии», НО-2007 (23-25 мая 2007 г., С.-Петербург).– С.568-574
 29. *Кушнир В.М., Бердников С.В.* Характеристики взвеси в Керченском проливе по данным контактных и дистанционных измерений // Геоинформатика.– 2010.– 2.
 30. *Витюк Д.М.* Взвешенное вещество и его биогенные компоненты.– Киев: Наукова думка, 1983.– 168 с.
 31. *Кушнир В.М.* Характеристики приповерхностного слоя Азовского моря по данным оптических сканеров системы MODIS // Исследование Земли из космоса.– 2009.– 3.– С.35-46.
 32. *Степаняк Ю.Д., Баширицева Е.Б.* Морфология и литодинамика о. Коса Тузла по данным дистанционных наблюдений // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.– Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2009.– вып.20.– С.100-107.
 33. *Кушнир В.М.* Оценка характеристик взвешенных наносов по данным оптических сканеров // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.– Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2008.– вып.16.– С.224-235
 34. *Moses W.J., Gitelson A.A., Berdnikov S., Povazhnyy V.* Estimation of chlorophyll-a concentration in case II waters using MODIS and MERIS data – successes and challenges // Environ. Res. Lett.– 2009.– 4.– P.45-53.
 35. *Кушнир В.М.* Придонный пограничный слой в Черном море: экспериментальные данные, турбулентная диффузия, потоки // Океанология.– 2007.– т.47, № 1.– С.39-48.
 36. *SWAN*. Technical documentation.– Delft University of Technology, Faculty of Civil Eng. and Geosciences, Environmental Fluid Mechanics Section, 2006.– 88 p.
 37. *Booij N., Ris R.C., Holthuijsen L.H.* A third-generation wave model for coastal regions, Part I, Model description and validation // Geoph. Res.– 1999.– 104, C4.– P.7649-7666.
 38. *Kallos G., Nickovic S., Papadopoulos A., et al* The regional weather forecasting system skiron: an overview // Intern. Symp. on Regional Weather Prediction on Parallel Computer Environments (University of Greece, October 15-17, Athens).– 1997.
 39. *Федоров С.В.* Особенности использования модели SWAN для расчета поверхностных волн в Керченском проливе // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.– Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2008.– вып.16.– С.303-313.
 40. *Иванов В.А., Шапиро Н.Б.* Моделирование течений в Керченском проливе // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.– Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2004.– вып.10.– С.207-232.

41. *Рябцев Ю.Н., Шапиро Н.Б.* Моделирование сезонной изменчивости Черного моря // Морской гидрофизический журнал.– 1997.– 1.– С.12-24.
42. *Кушнир В.М., Федоров С.В., Петренко Л.А.* Реакция Азово-Черноморского бассейна на интенсивный циклон 10-11 ноября 2007 г. по данным дистанционного зондирования // Морские испытания.– 2008.– 1.– С.62-81.
43. *Яковлева Д.В., Толкаченко Г.А.* Исследование особенностей суточной изменчивости оптической толщины аэрозоля в атмосфере над Черным морем // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.– Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика 2008.– вып.16.– С.212-223.
44. *Кушнир В.М., Кортаев Г.К., Коган Ф., Повел А.* Взаимосвязь параметров береговой и морской среды северо-западной части Черноморского региона по данным мультиспектральных космических съемок // Исследование Земли из космоса.– 2010.– 4.– С.67-76.

Материал поступил в редакцию 16.10.2010 г.