

В.З.Дыкман, О.И.Ефремов

Морской гидрофизический институт РАН, г.Севастополь

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СООТНОШЕНИЯ В СИСТЕМЕ ВЗВЕСЬ – ТУРБУЛЕНТНОСТЬ ДЛЯ ПРИБРЕЖНОЙ ОБЛАСТИ МОРЯ

Приводятся результаты кинетического рассмотрения проблемы перемещения крупной песчаной взвеси в придонном пограничном слое вблизи берега под действием волн. Волны фронтального направления формируют анизотропную структуру придонной скорости, и направление суммарного движения наносов зависит от частоты основной волны. Для коротких периодов поток наносов является аккумуляющим, а при низкой частоте волны – размывающим. Отдельно рассматривается гравитационный поток минеральных частиц при движении волн вдоль береговой линии, который направлен всегда от берега на глубину, независимо от частоты и фазы волны. Представлены различные модели расчета профилей минеральной и органической взвеси при наличии и отсутствии регулярных обрушений ветровых волн по данным измерений с помощью комплекса аппаратуры «Донная станция».

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *придонный слой, энергия турбулентности, обрушение волн, профиль взвеси, прибрежная область моря*

doi: 10.22449/2413-5577-2019-4-73-80

Введение. Движения в верхнем слое моря, ответственные за обменные процессы с атмосферой, в береговой зоне оказываются непосредственно связанными также с придонными явлениями. Одной из основных проблем здесь является изучение закономерностей переноса песчаных осадков 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. Гидродинамические теории, которые не исходят из каких-либо предположений о структуре взвешенного твердого материала, пригодны для установления общих закономерностей, связывающих различные эффекты, и являются теориями феноменологическими. В одной из наиболее значимых работ приводятся конкретные расчетные схемы и рекомендации прогноза динамики наносов в прибрежной зоне моря [1].

Кинетическое рассмотрение проблемы движения наносов, когда взвесь представляется в виде совокупности дискретных частиц, характеризуемых функциями распределения по их размерам, в некоторых отношениях предпочтительнее гидродинамического описания. Кинетический подход к описанию движения взвесей базируется на использовании модельных представлений о детальной структуре исследуемых процессов. Приходится иметь дело с вероятностными функциями распределения твердых и жидких частиц, частотными и пространственными спектрами волновых и турбулентных движений.

© В.З.Дыкман, О.И.Ефремов, 2019

Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2019. вып.4. С.73-80.

Развиваемая в Морском гидрофизическом институте (МГИ) РАН 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 модель пульсирующего придонного турбулентного пограничного слоя [2 – 4].

Различные модели движения наносов в береговой зоне требуют подтверждения в виде результатов, получаемых в натуральных условиях. На Бакальской косе в 2010 – 2012 гг. проводились исследования с использованием разработанного в МГИ комплекса аппаратуры «Донная станция» (рис.1). Состав аппаратуры комплекса, методика измерений и обработки данных подробно описаны в [4, 7]. Главной особенностью комплекса является измерение трех компонент скорости течения в волновом и турбулентном участках спектра при посредстве единого пульсационного модуля.

Перенос крупной взвеси в прибойной зоне. Крупная минеральная взвесь концентрируется непосредственно у дна и переносится по нормали к берегу под действием интенсивных придонных скоростей волнового происхождения с амплитудой порядка 1 м/с и более. Такое движение является, в основном, возвратно-поступательным. Однонаправленный вдольбереговой перенос осуществляется сравнительно медленными постоянными течениями, которые сами по себе не могут обеспечить переход крупных частиц во взвешенное состояние.

На основе лабораторных данных работы [8] была разработана модель пульсирующего придонного пограничного слоя толщиной δ для прибрежной зоны с песчаным дном. В этой модели фазовые сдвиги не учитываются, а все соотношения выводятся для амплитуд и средних значений рассматриваемых величин [6]. Максимумы турбулентной энергии образуются дважды за период T , за это время крупные частицы в значительной своей части успевают перейти во взвешенное состояние и совершить поступательно-возвратное перемещение в направлении распространения волны. На горизонте δ максимумы турбулентных пульсаций появляются с задержкой $\tau = 0,83$ с, не зависящей от волновой амплитуды придонной скорости U_0 .

При фронтальном распространении ветровых волн структура волновых скоростей вблизи берега становится анизотропной, и задержка в развитии придонного турбулентного слоя приводит к разному направлению суммарного движения наносов в зависимости от частоты основной волны. Для коротких периодов поток наносов является аккумулялирующим, а при низкой частоте волны – размывающим [9].

Другой механизм размыва песчаных пляжей характерен для специфического случая движения ветровых волн вдоль береговой линии. Возвратно-поступательное перемещение крупной взвеси в этом случае также ориентируется по направлению волны, но гравитационный поток придонной взвеси направлен всегда от берега на глубину, независимо от частоты и фазы волны.

Указанный механизм перемещения наносов вызван тем обстоятельством, что диффузионное взвешивание частиц, определяемое инерционным ускорением в турбулентном потоке α_p , осуществляется по нормали к склону, а их

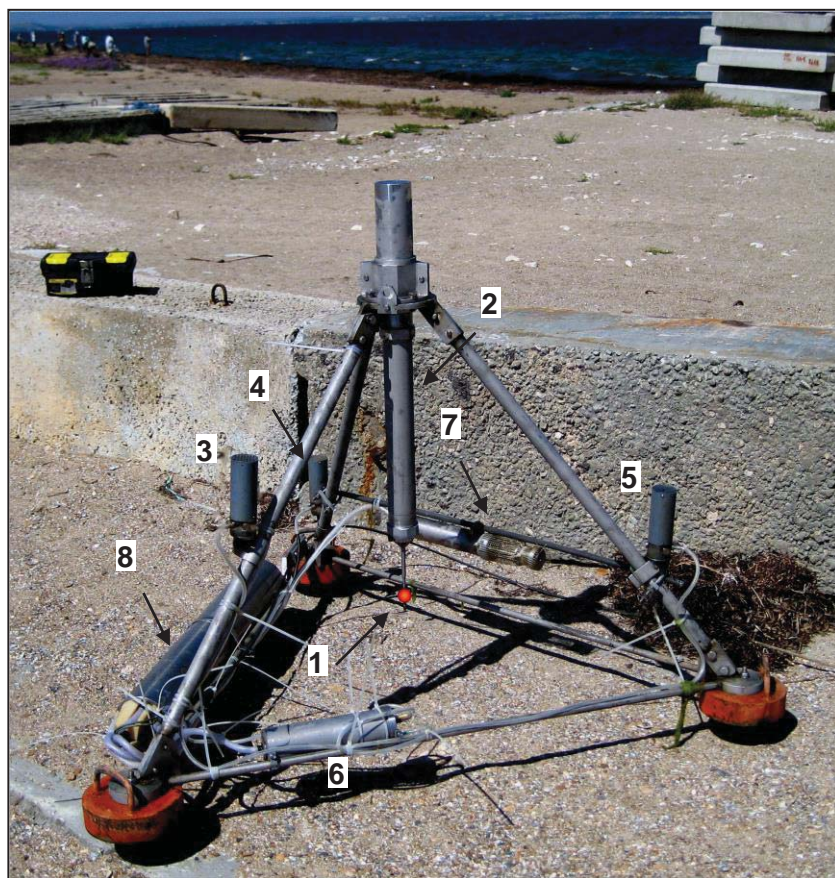
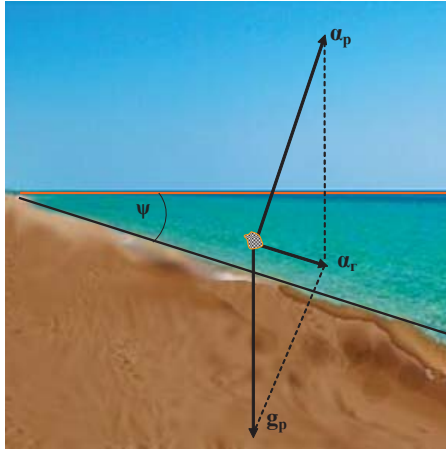


Рис. 1. Комплекс «Донная станция» на юго-восточной оконечности о.Коса Тузла. 1 – датчик пульсаций трёх компонент вектора скорости течения, температуры и электропроводности; 2 – измерители виброускорений по трём осям – крен, дифферент, азимутальный угол, а также гидростатического давления; 3 – 5 – ловушки взвеси, 6 – электроника ловушек; 7 – измеритель показателя ослабления направленного света (лазерный прозрачномер); 8 – центральный модуль (питание, связь).

гравитационное осаждение происходит по вертикали. В результате минеральные частицы приобретают направленную вдоль дна составляющую α_{Γ} редуцированного ускорения силы тяжести при падении в воде g_p . Схема гравитационного потока крупных частиц наносов представлена на рис.2. Средняя концентрация C крупных частиц в придонном слое здесь определяется амплитудой основной волны U_0 (м/с), $C = 44U_0$ кг/м³, средняя скорость гравитационного «сноса» зависит от уклона дна $\tan\psi$. Масса взвешенных крупных частиц в пограничном слое определяется как $M = C\delta = 1,65U_0^2$ кг/м² [9].

Оказалось возможным построить отдельную физическую модель гравитационного потока крупных частиц наносов по нормали к береговой линии и сопоставить характеристики модельного переноса с реальными событиями размыва Бакальской косы, зафиксированного во время экспедиции в конце августа – начале сентября 2010 г. В период с утра 31 августа до вечера



Р и с . 2 . Схема гравитационного потока крупных частиц наносов.

$= 0,51 \text{ м/с}^2$. С учетом запаздывания формирования пульсирующего придонного пограничного слоя время нахождения крупной частицы во взвешенном состоянии будет $t_0 = (T/2) - \tau = 0,92 \text{ с}$, а средняя за этот период скорость смещения частицы вдоль склона $V_0 = \alpha_\tau t_0 / 2 = 0,235 \text{ м/с}$. Окончательно для гравитационного потока Π крупных частиц наносов по нормали к береговой линии получаем $\Pi = MV_0(T - 2\tau)/T = 0,22 \text{ кг/(м}\cdot\text{с)}$, или около 0,8 т песка в час на метр береговой линии. Этот поток оказал дополнительное влияние на ситуацию гидрогенного размыва узкой части Бакальской косы, произошедшего в последующие сутки при западном ветре большей интенсивности и фронтальном направлении волн [9].

Энергетические соотношения в системе взвесь – турбулентность. Знание функций распределения частиц взвеси на каждом горизонте позволяет, вообще говоря, рассчитать любые ее характеристики. Вместе с тем, описать чисто статистическими методами обмен между различными уровнями очень трудно, и для расчета профиля массовой концентрации взвешенного материала приходится использовать осредненное уравнение диффузионной модели распределения концентрации взвесей $C(z)$ по вертикали

$$C(z)W_\Sigma(z) + K_\Sigma(z)\partial C(z)/\partial z = 0. \quad (1)$$

В этом уравнении $W_\Sigma(z)$ – средняя скорость осаждения частиц взвеси в турбулентном потоке, определяемая как первый момент вероятностного распределения частиц по гидравлической крупности [10].

Вертикальная составляющая коэффициента турбулентной диффузии $K_\Sigma(z)$ формируется суммарным воздействием более высокочастотной придонной турбулентности (коэффициент $K_2(z)$) и турбулентных флуктуаций, генерируемых волнами в подповерхностном слое (коэффициент $K_3(z)$), $K_\Sigma(z) = K_2(z) + K_3(z)$.

Численные решения находятся с учетом представлений о наличии энергетического баланса между потенциальной энергией вертикального профиля взвеси и кинетической энергией турбулентности, генерируемой в подпо-

этого же числа устойчивый северо-восточный ветер силой около 7 м/с сформировал на восточной стороне Бакальской косы движущиеся вдоль берега волны с периодом $T = 3,5 \text{ с}$ и амплитудой придонной скорости $U_0 \approx 1 \text{ м/с}$.

Для модельных расчетов учтем, что редуцированное ускорение g_p минеральной частицы с плотностью $\rho_0 = 2650 \text{ кг/м}^3$ при падении в неподвижной воде плотностью $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$ составит $g_p = 2(\rho_1 - \rho)g/(2\rho_1 - \rho) = 5,13 \text{ м/с}^2$, а уклон дна в точке измерений равен $\text{tg}\psi = 0,1$. Для составляющей ускорения взвешенной частицы по направлению вдоль склона получим $\alpha_\tau = g_p \sin\psi$

верхностном слое. Такой подход позволяет рассчитывать абсолютные значения массовой концентрации взвеси на каждом горизонте.

Типичный профиль коэффициента $K_{\Sigma}(z)$ имеет характерный минимум на высоте порядка 0,3 м над дном. Этот минимум отражает определенное «распределение обязанностей» между придонной и подповерхностной турбулентностью на мелководье.

Придонная турбулентность, характеризуемая кинетической энергией на единицу площади E_2 , производит первоначальное взмучивание осадков и действует на малом расстоянии от дна, а дальнейший транспорт взвеси в верхние слои осуществляется подповерхностной турбулентностью, имеющей энергию E_3 , которая в случае развитого ветрового волнения обладает намного большей энергией на единицу площади, чем придонная турбулентность. В стационарных условиях устанавливается определенное соотношение между потенциальной энергией взвеси и суммарной кинетической энергией турбулентных флуктуаций скорости течения.

$$\text{Уравнение (1) имеет решение } C_1(z) = C_1(0) \exp \left[- \int_0^z (W_{\Sigma}(z) / K_{\Sigma}(z)) dz \right].$$

Численные расчеты во многих случаях дают профили $C_1(z)$, резко спадающие у дна и в дальнейшем при увеличении z сохраняющие практически постоянный уровень концентрации до самой поверхности, что не соответствует реальным наблюдениям. Причина заключается в том, что однородное уравнение (1) не учитывает разницу в потенциальной энергии тяжелых частиц взвеси, находящихся на различных горизонтах над дном. Простой способ введения неоднородности заключается в учете корреляции между пульсациями концентрации и скорости осаждения.

Концентрация $C(z)$ представляется в виде $C(z) = \overline{C(z)} + C'(z)$, соответственно скорость осаждения $W(z) = \overline{W(z)} + W'(z)$, тогда $\overline{C(z)W(z)} = \overline{C(z)} \cdot \overline{W(z)} + \overline{C'(z)W'(z)}$. Теоретические оценки показывают, что скорость осаждения частиц взвеси при совместном падении больше, чем скорость каждой из них по отдельности [11], так что корреляция положительна и (1) можно переписать в виде

$$\overline{C(z)} \cdot \overline{W(z)} + K_{\Sigma}(z) \partial \overline{C(z)} / \partial z = - \overline{C'(z)W'(z)}. \quad (2)$$

Решение неоднородного уравнения (2) представляется суммой $C(z) = C_1(z) + C_2(z)$, где частное решение $C_2(z)$, чтобы компенсировать пропорциональное z увеличение потенциальной энергии частиц, предлагается выбрать в виде $C_2(z) = C_2(0)[D/(z + D)]C_1(z)/C_1(0)$, где $D = 1,63$ мм – характеристика крупности частиц донного грунта [5].

Постоянные $C_1(0)$ и $C_2(0)$ находятся из сопоставления потенциальных энергий каждого из профилей с кинетической энергией вертикальной компоненты турбулентных флуктуаций скорости.

Поскольку подъем частиц взвеси на верхние горизонты благодаря наличию минимума в распределении коэффициента турбулентной диффузии $K_{\Sigma}(z)$ носит эстафетный характер, имеет смысл в качестве уровня E тур-

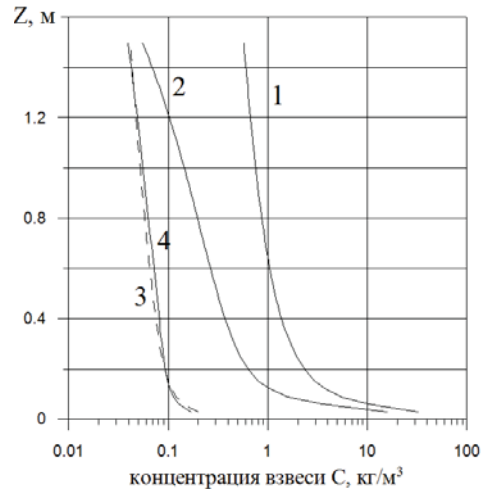
булентной энергии, эквивалентного потенциальной энергии стационарного профиля концентрации $C(z)$, выбрать среднее геометрическое энергий E_2 и E_3 , $E = \sqrt{E_2 E_3}$.

Изменение структуры турбулентных флуктуаций при наличии регулярных волновых обрушений на мелководье существенно увеличивает коэффициент турбулентной диффузии и ликвидирует характерный минимум на профиле $K_{\Sigma}(z)$, способствующий ограничению транспорта взвесей в верхние слои. Это обстоятельство является основанием для изменения схемы сопоставления потенциальной энергии профиля взвеси с кинетической энергией вертикальной компоненты турбулентных флуктуаций скорости.

Поскольку при наличии регулярных обрушений профиль коэффициента диффузии не содержит блокирующего минимума, подповерхностная турбулентность может принимать полноправное участие в формировании стационарного профиля взвеси, в соответствии с другой формулой для средней энергии E_0 , $E_0 = (E_2 + E_3)/2$.

Методика выполнения расчетов основывается на предположении, что песчаное дно в качестве источника минеральной взвеси имеет неограниченную мощность, а сепарация частиц песка регулируется условием баланса между кинетической энергией турбулентности и потенциальной энергией профиля взвеси. Результаты расчетов для случая постановки «Донной станции» на Бакальской косе 20 июня 2011 г. на глубине $H = 1,5$ м при ветре силой 8 м/с приведены на рис.3. Профиль с цифрой «1» соответствует песчаной взвеси при наличии регулярных обрушений волн, при этом во взвешенном состоянии находится примерно 6,32 кг/м². При отсутствии регулярных обрушений (профиль с цифрой «2») количество взвешенного материала уменьшается до 3,9 кг/м².

Ситуация с органической взвесью существенно иная. Общее количество частиц органического происхождения, находящихся на дне в прибрежной области в состоянии полного штиля, обычно сравнительно невелико, в пределах массовой концентрации на уровне 100 г/м². Редуцированное ускорение органических частиц при падении в неподвижной воде примерно на порядок меньше, чем для минеральных частиц [12], в силу этого потенциальная энергия профиля органической взвеси на небольших глубинах обычно оказывается малой по сравнению с энергией турбулентности, рассчитанной на единицу площади, и практически не влияет на энергетические соотношения, определяющие концентрацию песчаной взвеси.



Р и с . 3 . Профили различных фракций взвеси: 1 – минеральная взвесь при обрушениях волн; 2 – минеральная взвесь без обрушений; 3 и 4 – соответствующие профили для органической взвеси.

На рис.3 можно видеть, что органическая взвесь в обоих случаях (профили 3 и 4) целиком находится во взвешенном состоянии. Профили рассчитаны для количества органической взвеси $0,109 \text{ кг/м}^2$. Вместе с тем, даже при относительно небольшом содержании органики она может конкурировать с минеральной взвесью в верхнем слое при отсутствии регулярных обрушений волн. Это обстоятельство необходимо учитывать при дистанционных наблюдениях прозрачности.

Выводы. По результатам измерений с помощью «Донной станции» разработана модель перемещений крупной взвеси в прибойной зоне для волн различных направлений. Для фронтального распространения ветровых волн суммарный гидрогенный поток крупной взвеси зависит от частоты основной волны. При этом для коротких периодов поток наносов является аккумулялирующим, а при низкой частоте волны – размывающим. Другой механизм размыва песчаных пляжей характерен для движения ветровых волн вдоль береговой линии, когда возникающий гравитационный поток придонной взвеси направлен от берега на глубину независимо от частоты и фазы волны.

Энергетические соотношения в системе взвесь – турбулентность используются в кинетической схеме отдельного расчета вертикальных профилей концентрации минеральной и органической взвеси в условиях мелководья. Концентрация минеральной взвеси при наличии регулярных обрушений волн возрастает, в то время как концентрация органической компоненты взвеси в прибрежной зоне при увеличении ветровой нагрузки быстро входит в режим насыщения, диапазон ее изменчивости оказывается достаточно узким и при сильных ветрах напрямую не связан с наблюдаемым резким ростом концентрации песчаной взвеси.

Работа выполнялась по государственному заданию № 0827-2018-0003 «Фундаментальные исследования океанологических процессов, определяющих состояние и эволюцию морской среды под влиянием естественных и антропогенных факторов, на основе методов наблюдения и моделирования», шифр «Океанологические процессы».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Иванов В.А., Михинов А.Е.* Прогноз динамики наносов в прибрежной зоне (практические рекомендации и параметры расчетов) / Препринт.– Севастополь: МГИ АН УССР, 1991.– 52 с.
2. *Иванов В.А., Дыкман В.З., Ефремов О.И.* Функция распределения частиц взвеси в прибрежной области моря // Доп. НАН України.–2005.– № 1.– С.111-117.
3. *Иванов В.А., Дыкман В.З., Ефремов О.И.* Кинетика взвесей в прибрежной области моря // Морской гидрофизический журнал.– 2006.– № 4.– С.49-61.
4. *Современные методы и средства контроля морской среды* / Под ред. В.А.Иванова.– Севастополь: МГИ НАН Украины, 2006.– 113 с.
5. *Иванов В.А., Дыкман В.З., Ефремов О.И.* Кинетика движения взвесей в береговой зоне // // Международная конференция «Литодинамика донной контактной зоны океана», посвященной 100-летию со дня рождения профессора В.В.Лонгина (14-17 сентября 2009, г. Москва).– М: ГЕОС, 2009.– С.89-92.
6. *Иванов В.А., Дыкман В.З., Ефремов О.И.* Модель придонного турбулентного слоя для мелководья // Морской гидрофизический журнал.– 2010.– № 2.– С.49-62.

7. Дыкман В.З., Ефремов О.И., Пака В.Т., Ханаев С.А. Измерительный комплекс для исследования процессов обмена в придонной области моря // Системы контроля окружающей среды.– Севастополь: МГИ НАН Украины, 2001.– С.31-40.
8. Sleath J.F.A. Turbulent oscillatory flow over rough beds. – J. Fluid Mech.– 1987.– 182.– P.369-409.
9. Dykman V.Z., Efremov O.I., Volikov M.S. Normal-to-coast transfer of coarse suspension in a surf area: modeling and assessments based on the measurements by the instrumental complex «Donnaya Stantsiya» // Physical oceanography.– 2017.– iss.4.– С.66-78.
10. *Dynamical processes in coastal regions.*– Sofia: Publishing house of the Bulgarian Academy of Sciences, 1990.– 190 p.
11. Пиеннай-Северин С.В. О влиянии гидродинамического взаимодействия малых облачных капель на скорость их падения // Изв. АН СССР, серия геофиз. – № 8. – С.1045-1051.
12. Ефремов О.И. Гидравлическая крупность различных компонент взвеси в морской воде // Системы контроля окружающей среды.– Севастополь: МГИ НАН Украины, 2013.– С.35-43.

Материал поступил в редакцию 01.11.2019 г.

V.Z.Dykman, O.I.Efremov

ENERGY CORRELATIONS IN THE SYSTEM OF SUSPENSION AND TURBULENCE IN THE SEA COAST

The large suspended sandy sediment transport in a near-bottom boundary layer near coast under waves is kinetically considered. The waves of frontal direction form the heterogeneous structure of near-bottom current, and direction of total transport of sediments depends on frequency of basic wave. For short periods a sediment flow is accumulating, and at low frequency of wave it is erosive. The gravitation flow of mineral particles is separately examined when waves move along a coastline. It is directed always out coast to depth, regardless wave frequency and phase. The various models to calculate mineral and organic suspension profiles are introduced at presence and absence of the regular breaks of wind waves using measurements by the «Bottom station» complex.

KEYWORDS: near-bottom layer, energy of turbulence, break waves, profile of suspension, sea coast