

Моделирование динамики наносов в прибрежной зоне

И. С. НУДНЕР, В. В. МАКСИМОВ, Ю. Б. МАЙОРОВ, Д. В. БАБЧИК
*Научно-исследовательский центр 26 ЦНИИ Минобороны РФ,
Санкт-Петербург, Россия*
e-mail: wmaximov@mail.ru, inudner@mail.ru

In this paper some theoretical and experimental results addressing the important problem of inshore sediment dynamics are presented. Main features of the three modern software packages solving this problem are considered. A detailed list of references (in Russian) relevant to this problem is given.

Введение

С проблемой заносимости акваторий морских портов и изменения береговой линии человечество знакомо с давних лет. Еще древние финикийцы при строительстве портов Тир и Сидон (XIII–XII вв. до н. э.) стремились учитывать естественное движение наносов. В древнем Риме в ряде античных портов были построены сквозные молы для пропуска вдольбереговых наносов. Известно, что Леонардо да Винчи занимался лабораторным исследованием волнового движения. По-видимому, он первым из европейцев установил орбитальный характер движения жидких частиц в волне. Великий флорентинец имел ясное представление о существовании продольного перемещения береговых наносов и учитывал его при проектировании портов Чезаматико (Италия) и Гавр (Франция).

Как правило, решение проблемы заносимости акваторий, являющейся частью более общей проблемы динамики наносов, долгое время осуществлялось с помощью натуральных наблюдений. Лишь в начале XX в. начали предприниматься попытки решения этой сложной задачи теоретическими методами. В Советском Союзе активное решение задач переноса донных отложений началось примерно с середины XX в. Под руководством В. П. Зенковича была создана первая научная школа по изучению геоморфологии берегов. К решению различных задач динамики наносов стали применяться как экспериментальные, так и теоретические методы [1–47]. В настоящее время удалось получить теоретические решения ряда частных задач, подкрепив их экспериментальной проверкой.

Все основные изучаемые процессы взаимодействия волн, течений и движения наносов происходят в прибрежной зоне. Здесь происходит изменение параметров набегающих волн: начинает проявляться асимметрия движения. При подходе к берегу возникает рефракция волн, увеличение и укрупнение их гребней, что в большинстве случаев приводит к их обрушению (которое может происходить многократно). Волновое движение носит ярко выраженный турбулентный характер. Происходят процессы эрозии (размыва) и аккумуляции (накопления) берегового склона. Под действием волн, подходящих к

берегу под косым углом, и вдоль береговых течений появляется продольный транспорт наносов. Возникают прибрежные разрывные течения. Донные отложения, вовлекаемые в движение, имеют разнородный состав, от валунов (диаметром более 100 мм) до мелкого пелита (диаметром менее 0.001 мм). Промежуточный диапазон значений занимают галька, гравий, песок, алевроит.

При теоретическом решении задачи транспорта наносов делаются многочисленные упрощения (чтобы сделать задачу принципиально разрешимой) и вводятся дополнительные гипотезы (для замыкания получающихся систем уравнений). В немногочисленных случаях (например, [29–32]) удается получить удовлетворительное совпадение теоретических результатов с экспериментальными и натурными данными. Чаще же результаты теоретических моделей дают лишь качественное совпадение, различаясь по величине с экспериментальными данными в несколько раз. Указанное обстоятельство характеризует сложность и неизученность проблемы динамики наносов в целом, несмотря на предпринимаемые интенсивные попытки найти ее решение.

В данной работе кратко обсуждается современная классификация теоретических моделей, рассматривается методика проведения экспериментальных исследований заносимости акватории и проводится анализ ряда полученных результатов физического моделирования для акватории конкретного заданного объекта. Приводится подробное решение одной из важных задач геоморфологии берегов: задачи о переформировании береговой линии. Обсуждается три наиболее разработанных пакета программ, которые в принципе позволяют получить приближенное численное решение задачи о динамике наносов.

1. Классификация теоретических моделей динамики взвешенных наносов

В настоящее время существует три группы моделей, описывающих движение взвешенных наносов.

Первая группа моделей рассматривает движение твердой одиночной частицы. Размеры частицы полагаются малыми. Предполагается, что коэффициент сопротивления линейно зависит от относительной скорости частицы и окружающей ее жидкости. Учет нелинейности коэффициента сопротивления резко усложняет вычисления, которые приводят к громоздким выражениям и трудно алгоритмизуемы. Кроме того, остается неясным, как переносить результаты, полученные для одиночной частицы, на ансамбль частиц с учетом их взаимодействия между собой. Впрочем, имеются результаты, указывающие на то, что в большинстве случаев при достаточном удалении частиц друг от друга (один-два диаметра частиц) их взаимодействием можно пренебречь.

Вторая группа моделей вводит в рассмотрение систему из большого, но конечного числа частиц. Фактически они сводятся к начально-краевой задаче, записанной системой дифференциальных уравнений, которая описывает движение жидкости и частиц, находящихся в ней. Однако в настоящее время в рамках этих моделей рассматриваются лишь отдельные частные гипотезы о характере силового взаимодействия жидкости и твердых частиц. Кроме того, до сих пор остается неясным, как происходит взаимодействие движущихся частиц потока с твердыми границами. Поэтому существенное продвижение в решении задачи о движении наносов многочастичными моделями представляется проблематичным.

Третья группа моделей описывает движение потока жидкости со взвешенными наносами в виде двухфазных континуальных сред, взаимодействующих между собой. Уравнения для сред вводятся двумя способами: осреднением уравнений, выполняющихся для фаз, рассматриваемых в отдельности, или введением гипотез, получаемых из более общих соображений относительно возможного поведения двухфазной среды. Эта группа моделей в настоящее время применяется достаточно часто при построении вычислительных алгоритмов, несмотря на то, что можно указать большое количество ее слабых мест: корректное описание коэффициентов турбулентной диффузии; учет обратного воздействия взвеси на движение жидкости; большой произвол в выборе начальных и граничных условий; учет саморегуляции потока, содержащего взвесь, с дном и некоторые другие обстоятельства.

Фактически при выполнении расчетов динамики наносов сначала рассчитывают волновой режим в исследуемой акватории, а затем найденные гидродинамические характеристики вводят в уравнения для расчета концентрации. Это уравнения конвекции-диффузии. Следует отметить, что они справедливы для малых концентраций и частиц небольшого размера. (На практике производится расчет по каждой фракции взвеси отдельно и результаты осредняются в соответствии с теми или иными предположениями.) В случае больших изменений батиметрии и береговой линии волновой режим пересчитывается и процедура повторяется.

2. Экспериментальные исследования заносимости акватории объекта

Необходимым предварительным этапом исследований заносимости является определение волнового режима на акватории объекта. Оно выполнено на основе расчетно-теоретических и экспериментальных исследований. Рассмотрены все варианты компоновки оградительных сооружений. При их оценке основным требованием было уменьшение высоты волн на внутренней акватории до заданной величины. При определении защищенности акватории и выдаче рекомендаций по плановой компоновке принималась заданная обеспеченность расчетного шторма. Применялось моделирование с разными горизонтальным и вертикальным масштабами, что потребовало введения в экспериментальные результаты для высот волн коэффициентов искажения дифракции, получаемых расчетным путем. Экспериментальные исследования волнового режима проводились на неразмываемой пространственной модели объекта, выполненной на мелководной ступени большого опытового бассейна. Горизонтальный масштаб моделирования составил 1: 100, вертикальный — 1: 25. Это обстоятельство обусловлено возможностью размещения модели в бассейне и обеспечения необходимых параметров волнения. Волнение создавалось передвижным волнопродуктором балочного типа. Опыты проводились для наиболее волноопасного направления. Параметры волн регистрировались на подходе к акватории, в канале и на самой акватории. Полученные значения использовались далее для теоретической оценки заносимости и сравнения с данными экспериментов.

2.1. Задачи, состав и методика экспериментальных исследований

Основной задачей исследований являлась разработка инженерных решений по уменьшению запыленности объекта наносами. Экспериментальные исследования были на-

правлены на изучение эффективности вариантов защиты акватории объекта от наносов, образующихся при комплексном воздействии на подводный склон волн и течений, и основывались на методе сравнительного анализа вариантов защиты.

Эксперименты проводились на пространственной установке, расположенной в мелководной ступени опытового бассейна, с использованием модели объекта, на которой предварительно были проведены исследования характеристик волнового режима, после покрытия рабочей части модели слоем песка толщиной 10 см со средним диаметром частиц $D_0 = 0.22$ мм (рис. 1). Песчаное основание модели подходного канала было покрыто цементным раствором. Тем самым создавалась возможность количественной оценки объема осевших в подходном канале наносов. Отметка воды, заполняющей установку, соответственно была увеличена на 10 см с целью сохранения глубин на входе в канал и составила 50 см.

За экспериментальный сезон проведено девять опытов (рис. 2). За основной принят вариант существующей в настоящее время компоновки акватории (опыт 1). Особое внимание в исследованиях обращено на варианты ограждения подходного канала парными параллельными молами. Было исследовано два случая: распределение скоростей течения воды по подводному склону и волнения, соответствующего северо-восточному румбу в натуре. Один случай распределения скоростей (опыт 6) аналогичен распределению скоростей по подводному склону (опыт 1). Другой (опыт 3) — с максимумом скоростей, смещенным на большие глубины, и числами Фруда $Fr = 0.022 \dots 0.036$. В аналогичных условиях рассмотрены варианты с ограждением канала парными молами и усиленными подводными банкетками, развернутыми относительно оси канала на угол 25° (опыты 2 и 7).

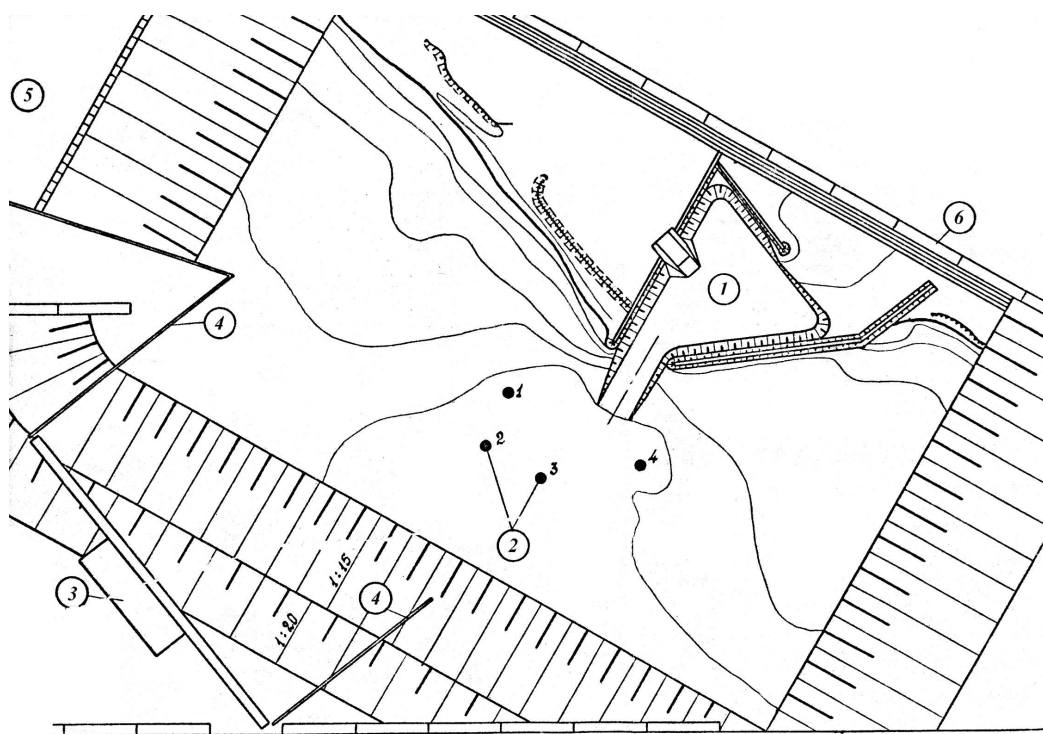


Рис. 1. Компоновка акватории: 1 — моделируемая акватория; 2 — волномеры; 3 — волнопродуктор; 4 — выгородки из щитов; 5 — водобойный колодец; 6 — выгородки из железобетонных блоков

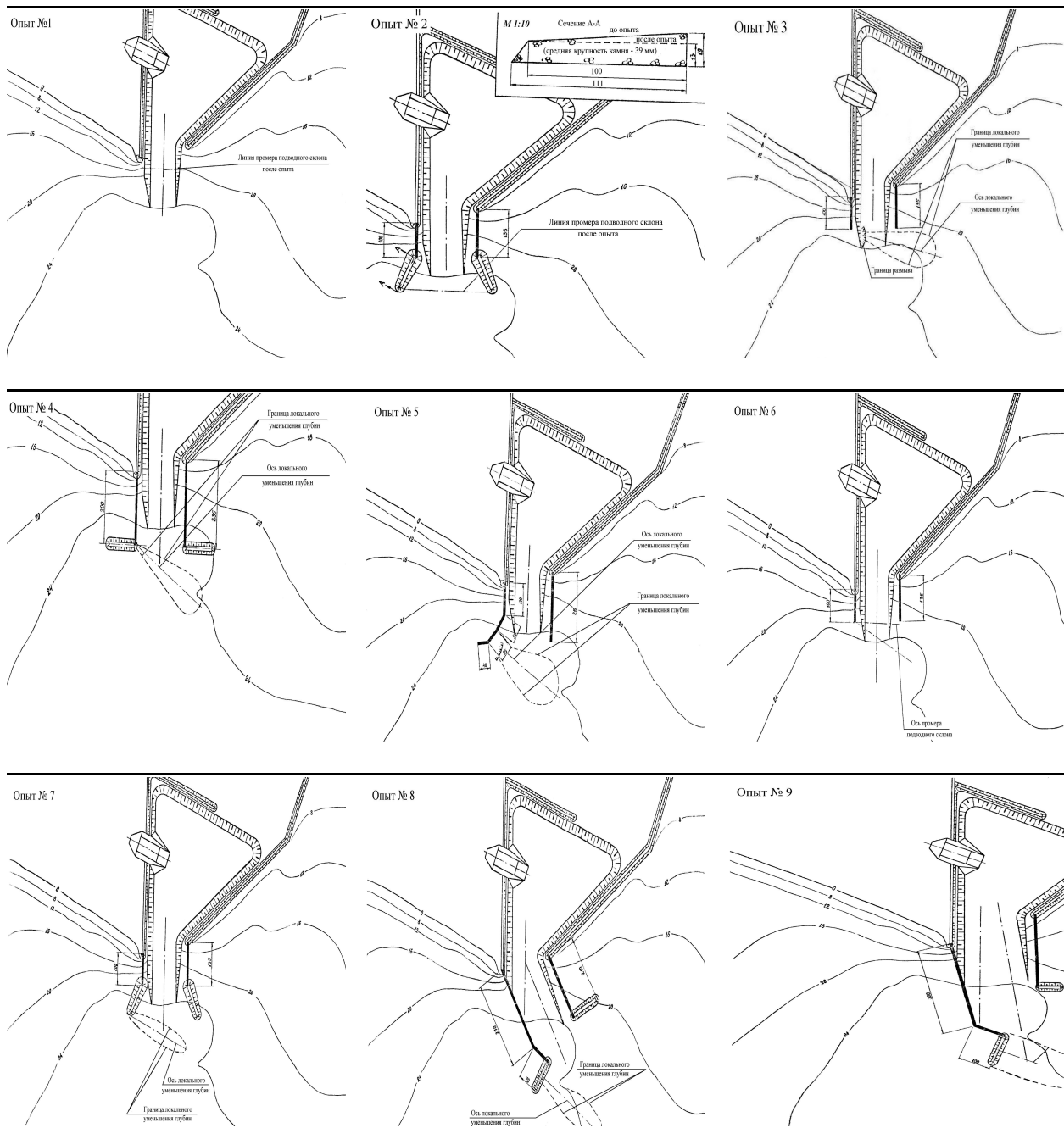


Рис. 2. Исследуемые варианты. Масштаб 1: 50

Ограждение канала парными молами увеличенной длины моделировалось в условиях течения с числами Фруда $Fr = 0.023$ на изобате 16 см и $Fr = 0.035$ — на изобате 24 см (опыт 4).

Волнение во всех вариантах имело северо-восточное направление.

Далее исследовался вариант с удлинением и разворотом южного мола в восточном направлении (опыт 5) и удлинением северного мола параллельно оси канала. Числа Фруда на тех же изобатах равны соответственно $Fr = 0.025$ и $Fr = 0.031$.

Опыты 8 и 9 — это варианты с разворотом оси канала на 30 и 10° относительно своего первоначального положения; продолжение южного мола имело ломаный профиль.

У голов молов были расположены подводные банкеты. Числа Фруда на упомянутых выше изобатах равны соответственно $Fr = 0.023$ и $Fr = 0.02 \dots 0.03$.

Поскольку заносимость объекта обусловлена как вдольбереговым движением наносов, так и движением наносов по нормали к нему, моделирование их представляет собой задачу повышенной сложности. Задача решалась следующим образом. За основу было принято качественное сопоставление рассматриваемых вариантов защитных мероприятий. Каждый вариант сравнивался с базовым (существующая в настоящее время компоновка акватории) по количеству наносов, осевших на акватории и в подходном канале. Затем определялась деформация подводного склона на входе в канал.

Поскольку годовую заносимость натурального объекта моделировать практически невозможно, то выполнялось моделирование лишь части этой заносимости, по времени соответствующей длительности расчетного шторма. Используемый метод качественного сопоставления предполагает равенство значений времен проведения всех опытов, причем это время не должно превышать значения, при котором происходит предельное заполнение наносами подходного канала в опыте с существующей в настоящее время компоновкой объекта. Это время, оказавшееся равным 1.5 ч, и было принято в качестве времени проведения каждого опыта.

Параметры волн выбирались по результатам исследований волнового режима и были следующими: $h = 7.5$ см и $T = 1.33$ с. Таким образом, число волн, воздействовавших на подводный склон, в течение опыта длительностью 1.5 ч составляло $N_{\text{mod}} = t_{\text{st}}/T_{\text{mod}} = 1.5 \cdot 3600/1.33 = 4100$. В натуре среднее число волн в случае шторма с северо-восточного направления, повторяемостью один раз в 10 лет, составляет $N_{\text{nat}} = t_{\text{st}}/T_{\text{nat}} = (14 \dots 16)3600/7.2 = (7 \dots 8)10^3$.

Течение на модели обеспечивалось с помощью установки, включающей насосную станцию, закачивающую слабосоленую воду с глубоководной ступени опытового бассейна в систему трубопроводов, и водовыпуски. При достижении расхода воды, подающейся на модель, максимального значения $Q = 0.36$ м³/с включался волнопродуктор. Этот момент считался началом опыта.

В течение каждого опыта с помощью микровертушек осуществлялись промеры скоростей течения воды в намеченных створах, а также производилась запись волн четырьмя волномерами. После окончания опыта установка осушалась, производилась оценка заносимости подходного канала и акватории. Для этого после каждого шага опыта собирались наносы, осевшие в подходном канале и на акватории объекта, которые далее высушивались и взвешивались.

Для проведения линии деформации подводного склона в районе начала подходного канала визуально определялась область локального уменьшения глубин, обычно расположенная в начале подходного канала. Затем намечалась ось максимального уменьшения глубин (ось подводной косы), вдоль которой затем определялся профиль этого аккумулятивного образования.

2.2. Результаты экспериментальных исследований

В опыте 1 исследовалась заносимость подходного канала в варианте существующей в настоящее время компоновки объекта. Значения чисел Фруда, соответствующие средним скоростям на вертикалях, в этом опыте были несколько больше чисел Фруда для аналогичных вертикалей в натуральных условиях. Во время проведения эксперимента на подводном склоне наблюдалось грядовое перемещение наносов, которое привело

к полной заносимости подходного канала. Вес осевших в подходном канале наносов составил 314.7 кг.

В опытах 6 и 3 изучалось влияние удлинения южного мола на заносимость подходного канала. Результаты показали, что заносимость подходного канала существенно зависит от распределения скоростей по подводному склону. Если после проведения опыта 3 заносимость подходного канала практически отсутствовала, то после проведения опыта 6 вес осевших в канале наносов был равен 118.3 кг. Вместе с тем удлинение южного мола позволило снизить заносимость подходного мола на 62 % по сравнению с заносимостью подходного канала в варианте существующей в настоящее время компоновки объекта. Однако удлинение южного мола вызвало увеличение скоростей у головы этого мола, что способствовало образованию воронки размыва в этом районе и росту подводной косы. При этом локальное уменьшение глубин на входе в канал в опыте 6 оказалось больше, чем в опыте 3.

Таким образом, распределение скоростей по подводному склону сказывается и на размерах подводной косы, образующейся на входе в канал. Следует заметить, что в опыте 6 наблюдалось рифельное движение наносов вдоль подходного канала на акваторию, хотя поступление наносов на акваторию объекта за время опыта было незначительным.

С целью уменьшения заносимости подходного канала и уменьшения размеров подводной косы, образующейся на входе в канал, проведены опыты 2 и 7, в которых к удлиненным молам достраивались усиленные банкеты из каменной наброски, развернутые от канала относительно его оси на 25 %. Распределение скоростей по подводному склону в опыте 2 было аналогично распределению скоростей в опыте 3. Эпюра скоростей в опыте 7 была аналогична эпюре скоростей в опыте 6.

Результаты экспериментов показали, что вариант комплексной защиты (опыт 7) позволяет уменьшить заносимость подходного канала на 88 % по сравнению с вариантом существующей в настоящее время компоновки объекта (опыт 1).

Распределение средних скоростей по подводному склону влияет на заносимость подходного канала и размеры аккумулятивных форм, образовавшихся за подводными банкетами. Сделанный вывод подтверждает то, что если в опыте 7 появилась подводная коса меньших размеров, чем в опыте 6, то в опыте 2 четко выраженного аккумулятивного образования не отмечено. В этих опытах наблюдалось рифельное движение наносов вдоль канала, однако заносимость акватории за время опыта была незначительной.

Дальнейшие эксперименты были посвящены вопросам уменьшения заносимости за счет увеличения длины оградительных сооружений и изменения их планового размещения (опыты 4, 5, 8 и 9).

В результате этих экспериментов установлено, что заносимость подходного канала и акватории после проведения этих опытов практически отсутствовала, однако у голов южных моллов образовывались аккумулятивные формы в виде подводных кос, которые под разными углами пересекали ось подходного канала.

Наибольших размеров подводная коса образовывалась в опытах 4 и 5. Подводная коса наименьших размеров возникла после опыта 8.

Подводные косы, образовавшиеся в опытах 4 и 5, располагались в основном в пределах канала между южным и северным молами, т. е. перекрывали собой вход в канал.

В опытах 8 и 9 подводные банкеты предотвращали размыв головы южного мола; в опыте 4 размыв подводного склона наблюдался за банкетом. В опыте 5 сильному размыву подвергся участок разворота южного мола в восточном направлении (рис. 3).

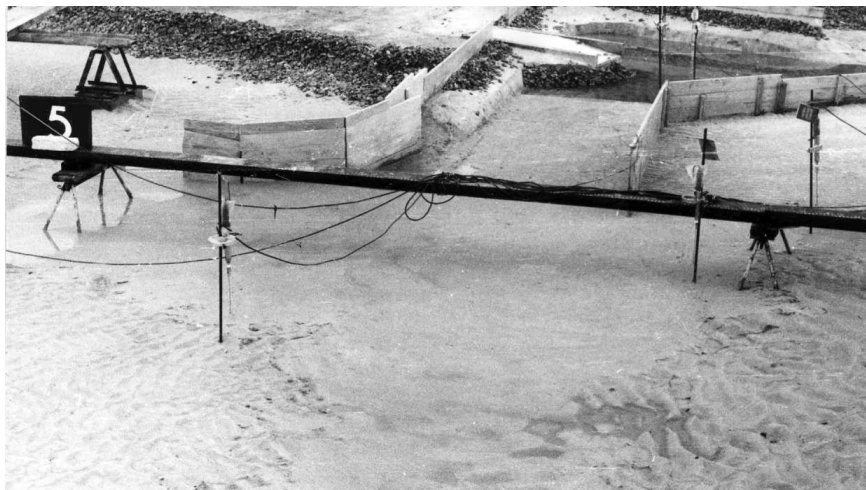
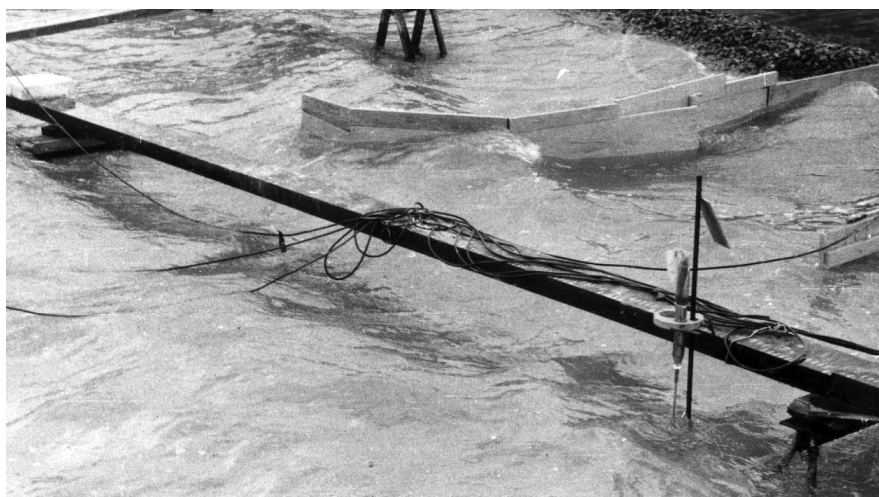
*а**б**в*

Рис. 3. Опыт 5: *а* — вид на модель объекта перед опытом; *б* — вид на южный мол во время проведения опыта; *в* — после проведения опыта

Таким образом, результаты экспериментов позволяют сделать следующие выводы.

1. Усиленные каменные банкеты снижают размыв грунта у голов молв и уменьшают размеры подводных аккумулятивных образований в районе входа в канал.
2. Наибольшую защищенность от вызванной штормами заносимости наносами в восточной четверти подходного канала и акватории объекта обеспечивает развитие южного мола по вариантам 8 и 9.

3. Теоретическая модель изменения береговой линии

Литодинамические процессы, протекающие на участках побережья с прилегающей к ним акваторией, часто приводят к переформированию дна и линии берега. Поэтому при выборе мест строительства новых портов необходимо учитывать характер таких процессов. Несмотря на то что до возведения морского гидротехнического объекта проводятся определенные изыскания, а при проектировании предусматриваются необходимые меры защиты, проблемы, связанные с отложением наносов и размывом, решаются трудно и требуют значительных затрат при последующей эксплуатации комплексов морских гидротехнических сооружений. Поэтому для прикладной гидромеханики имеет большое значение исследование как самих процессов динамики наносов, так и процессов изменения береговой линии и форм профиля подводного берегового склона.

3.1. Изменение береговой линии при отложении наносов

В естественных условиях дно моря представляет собой слой несвязного грунта из песка, гальки, ила или их смеси. При отсутствии волн можно говорить о поверхности раздела вода–грунт. При волнении возникает поток частиц из донного слоя через поверхность раздела в водный слой. В результате этого частицы грунта перемешиваются с водой. В водном слое частицы грунта находятся во взвешенном состоянии. Крупные, тяжелые частицы не переходят поверхность раздела.

В случае твердого недеформированного дна береговая линия задается уравнением

$$H(x, y) = 0, \quad (1)$$

которое является неявным заданием функции $y = f(x)$, определяющим линию берега.

Ординаты поверхности раздела определяются функцией

$$z = -D(x, y, t), \quad (2)$$

которая заранее не известна.

При волнении в одних местах береговой зоны происходит аккумуляция наносов, а в других — размыв грунта.

В случае нетвердого дна, верхняя граница которого является поверхностью раздела $z = -D(x, y, t)$, линия берега $y = \eta(x, t)$ будет определяться уравнением

$$D(x, y, t) = 0. \quad (3)$$

Таким образом, имеется два слоя. Верхний, водный, со взвешенными в нем частицами (наносами) и нижний, донный, слой крупных и мелких частиц, насыщенный водой. Донный слой имеет сложную реологию. Задача исследования динамики как водного, так и донного слоев является не только сложной, но и не определенной.

В настоящее время математическое моделирование процесса воздействия волн на береговую зону сводят к составлению и решению уравнения, описывающего форму береговой линии $y = \eta(x, t)$ с учетом соответствующей гипотезы о векторе потока наносов. Предполагают, что поперечный профиль берега принимает форму устойчивого равновесия. В этом случае поперечным перемещением наносов можно пренебречь. Это означает, что формирование (изменение) линии берега происходит только за счет вдольберегового потока наносов.

Рассмотрим сечение берега плоскостью $x = \xi$ и в нем область S , ограниченную вертикалью в точке $(\xi, \eta(\xi, t))$. Полагаем, что ось x направлена вдоль берега, ось y — перпендикулярно в сторону моря, ось z — вертикально вверх. Система осей $Oxyz$ — правая.

В момент времени t площадь области S определяется величиной

$$S(\xi, t) = \int_0^{\eta(\xi, t)} H(\xi, y) dy, \quad (4)$$

причем

$$\frac{\partial S}{\partial t} = H(\xi, \eta(\xi, t)) \frac{\partial \eta}{\partial t}. \quad (5)$$

Рассмотрим объем участка берега, равный $S(\xi, t)dx$. За единицу времени этот объем изменится на величину

$$\frac{\partial S}{\partial t} dx dt.$$

Такое изменение объема вызвано потоком наносов, равным

$$Q_x = -Q \cos \alpha, \quad (6)$$

направленным вдоль оси x .

Согласно закону баланса потока наносов имеем равенство

$$H(x, \eta) \eta_t dx = Q_x|_x^{x+dx}. \quad (7)$$

Из выражения (7) следует уравнение

$$H(x, \eta) \frac{\partial \eta}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x} (Q \cos \alpha). \quad (8)$$

Здесь Q — поток наносов вдоль линии берега; α — угол между касательной к линии берега и осью x ; $\operatorname{tg} \alpha = \partial \eta / \partial x$. Расход наносов, формирующих линию берега, вызывается действием волн. Величина расхода определяется скоростью движения частиц наносов и зависит от очертаний линии берега. В формуле для расхода Q это обстоятельство учитывается зависимостью угла θ между фронтом набегающей волны и касательной к линии берега [14, 15].

Пусть угол γ определяет направление фронта волны (рис. 4). Тогда можно записать

$$\theta = \gamma - \alpha. \quad (9)$$

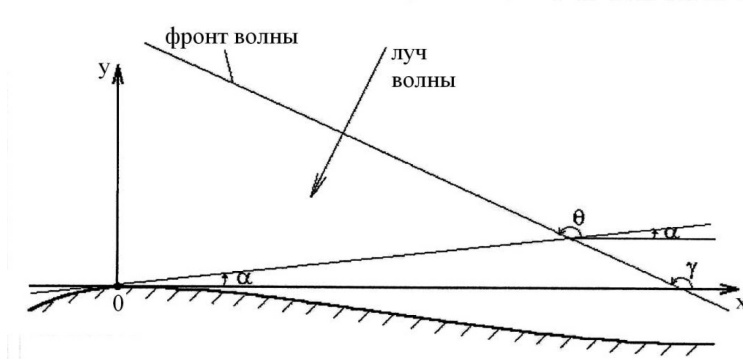


Рис. 4. Схема к задаче об изменении береговой линии

Учитывая равенства

$$\frac{\partial Q}{\partial x} = -Q' \frac{\partial \alpha}{\partial x}, \quad \frac{\partial \alpha}{\partial x} = \frac{\eta_{xx}}{1 + \eta_{xx}^2}, \quad Q' = \frac{\partial Q}{\partial \theta}, \quad (10)$$

запишем уравнение для определения линии берега (8) в виде

$$H(x, \eta) \frac{\partial \eta}{\partial t} = [Q'(\gamma - \alpha) \cos \alpha + Q(\gamma - \alpha) \sin \alpha] \frac{\eta_{xx}}{1 + \eta_{xx}^2}, \quad \cos \alpha = \cos(\gamma - \theta). \quad (11)$$

Представляя Q в виде $Q(\theta) = B \sin 2\theta$, из уравнения (11) получим

$$H(x, \eta) \frac{\partial \eta}{\partial t} = B \left\{ 2 \cos \alpha [\cos 2\gamma (1 - \operatorname{tg}^2 \alpha) + 2 \sin 2\gamma \operatorname{tg} \alpha] + \right. \\ \left. + \sin \alpha [\sin 2\gamma (1 - \operatorname{tg}^2 \alpha) - 2 \cos 2\gamma \operatorname{tg} \alpha] \right\} \frac{\eta_{xx}}{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha}. \quad (12)$$

При малых значениях угла α уравнение (12) существенно упрощается:

$$H(x, \eta) \frac{\partial \eta}{\partial t} = 2B \cos 2\gamma \frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2}. \quad (13)$$

Уравнение (13), как и более общее уравнение (12), нелинейное. Решать их нужно численными методами.

В случае крутого подводного склона можно считать, что $H(x, y) = \text{const}$. Тогда уравнение (13) будет линейным:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = a^2 \frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2}, \quad a^2 = \frac{2B}{H} \cos 2\gamma. \quad (14)$$

Для определения изменения береговой линии уравнение (14) решается при начальном условии

$$\eta(x, 0) = \eta_0(x), \quad |x| < \infty, \quad t > 0. \quad (15)$$

Решение задачи (14) и (15) будет иметь вид

$$\eta(x, t) = \int_{-\infty}^{\infty} G(x, t, \xi) \eta_0(\xi) d\xi, \quad G(x, t, \xi) = \frac{1}{\sqrt{4\pi a^2 t}} \exp\left[-\frac{(x - \xi)^2}{4a^2 t}\right]. \quad (16)$$

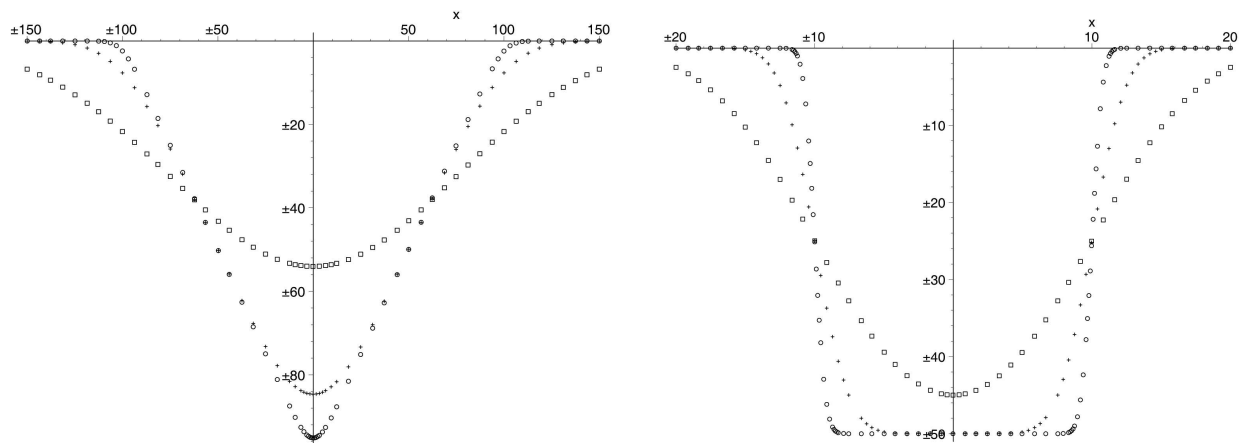


Рис. 5. Береговая линия треугольной и прямоугольной бухт для трех моментов времени

Задавая функцию $\eta_0(x)$, можно достаточно просто определить $\eta(x, t)$ — береговую линию.

Модельные примеры эволюции береговой линии бухт, имеющих первоначально треугольную

$$\eta_0(x) = \begin{cases} |x| - 100, & |x| < 100, \\ 0, & |x| \geq 100, \end{cases} \quad (17)$$

и прямоугольную форму

$$\eta_0(x) = \begin{cases} -50, & |x| < 10, \\ 0, & |x| \geq 10, \end{cases} \quad (18)$$

под действием волн, приведены на рис. 5. В обоих случаях первая форма береговой линии (обозначена кружками) получена для некоторого момента времени, близкого к начальному. Вторая линия (крестики) была вычислена для момента времени, в 10 раз большего. И, наконец, третья линия (квадратики) рассчитывалась во время, в 10 раз большее времени вычисления второй линии. Из рисунков видно, что линейная модель в целом описывает процессы аккумуляции и абразии берегов, но не учитывает многих процессов, имеющих место при транспорте наносов.

3.2. Отложение наносов у мола

Рассмотрим задачу о защите акватории порта от наносов. Один из вариантов решения задачи — возведение мола поперек движения наносов. Мол представляет собой твердую вертикальную стенку и играет роль наносозадерживающего сооружения (рис. 6). На плоскости xOy мол изображается в виде отрезка вдоль оси y длины L :

$$x = 0, \quad 0 \leq y \leq L. \quad (19)$$

Пространство между линией берега и молем называют входящим углом. Здесь происходит отложение наносов, которые изменяют линию берега с течением времени.

Задачу о заполнении входящего угла рассматривают для двух стадий [15]. Граничным между стадиями является момент времени t_1 , когда наносы достигают оголовка

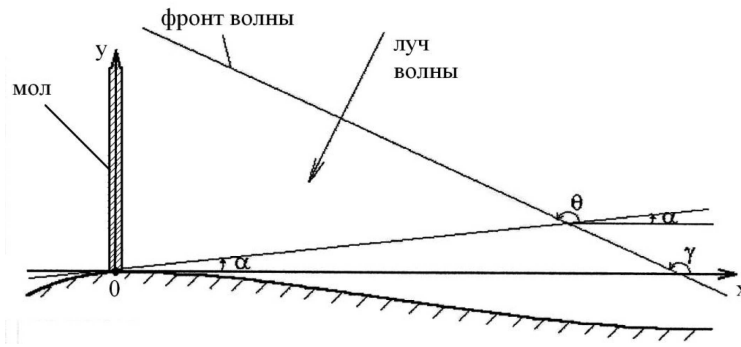


Рис. 6. Схема к задаче о заносимости входящего угла

мола. Для первой стадии ($0 \leq t \leq t_1$) задача сводится к решению уравнения баланса наносов при условиях

$$\eta(x, 0) = \eta_0(x); \quad (20)$$

$$Q_x = 0, \quad x = 0, \quad 0 \leq t \leq t_1, \quad \eta(0, t_1) = L; \quad (21)$$

$$\eta(x, t) \rightarrow 0, \quad x \rightarrow \infty, \quad t > 0. \quad (22)$$

С момента времени $t = t_1$ условия задачи имеют вид

$$\eta(x, t_1) = \eta_1(x) = \eta(x, t_1 - 0); \quad (23)$$

$$\eta(0, t) = L, \quad t \leq t_1. \quad (24)$$

Можно численно решить задачу о заполнении входящего угла при малых значениях α . В этом случае используются уравнение баланса наносов (13) и граничные условия

$$\frac{\partial \eta}{\partial x} = \frac{1}{2} \operatorname{tg} 2\gamma, \quad x = 0, \quad \eta(x, t) \rightarrow 0, \quad x \rightarrow \infty. \quad (25)$$

Рассмотрим частный случай задачи. Будем считать, что береговой склон крутой. Уравнение и условия задачи записываются следующим образом:

$$\eta_t = a^2 \eta_{xx}, \quad x \geq 0, \quad 0 \leq t \leq t_1; \quad (26)$$

$$\eta(x, t) = \eta_0(x), \quad t = 0; \quad (27)$$

$$\eta_x(0, t) = \frac{1}{2} \operatorname{tg} 2\gamma = \mu; \quad \eta(x, t) \rightarrow 0, \quad x \rightarrow \infty. \quad (28)$$

Решение удастся получить в явном виде. Введем новую функцию

$$V = \eta_x - \mu.$$

Тогда функция V будет решением задачи

$$V_t = a^2 V_{xx}, \quad x \geq 0, \quad 0 \leq t \leq t_1, \quad (29)$$

$$V(x, 0) = \frac{d\eta_0}{dx} - \mu = V_0(x), \quad V(0, t) = 0. \quad (30)$$

Решение задачи имеет вид

$$V = \frac{1}{\sqrt{4\pi a^2 t}} \int_0^\infty \left(\exp\left[-\frac{(x-\xi)^2}{4a^2 t}\right] - \exp\left[-\frac{(x+\xi)^2}{4a^2 t}\right] \right) V_0(\xi) d\xi. \quad (31)$$

Учитывая, что

$$\frac{1}{\sqrt{4\pi a^2 t}} \int_0^\infty \left(\exp\left[-\frac{(x-\xi)^2}{4a^2 t}\right] - \exp\left[-\frac{(x+\xi)^2}{4a^2 t}\right] \right) d\xi = \Phi\left(\frac{x}{\sqrt{4a^2 t}}\right), \quad (32)$$

$$\Phi(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x \exp(-\alpha^2) d\alpha, \quad (33)$$

получим

$$\eta_x = \mu \left[1 - \Phi\left(\frac{x}{\sqrt{4a^2 t}}\right) + \frac{1}{\sqrt{4\pi a^2 t}} \int_0^\infty \left(\exp\left[-\frac{(x-\xi)^2}{4a^2 t}\right] - \exp\left[-\frac{(x+\xi)^2}{4a^2 t}\right] \right) \frac{d\eta_0}{dx} d\xi \right]. \quad (34)$$

В результате интегрирования уравнение береговой линии примет следующую форму:

$$\begin{aligned} \eta(x, t) = \mu \left\{ 2a\sqrt{\frac{t}{\pi}} \exp\left(\frac{x^2}{4a^2 t}\right) - x \left[1 - \Phi\left(\frac{x}{2a\sqrt{t}}\right) \right] + \right. \\ \left. + \frac{1}{2a\sqrt{\pi t}} \int_0^x \int_0^\infty \left(\exp\left[-\frac{(\beta-\xi)^2}{4a^2 t}\right] - \exp\left[-\frac{(\beta+\xi)^2}{4a^2 t}\right] \right) \frac{d\eta_0}{dx} d\xi d\beta \right\}, \quad (35) \\ x \geq 0, \quad 0 \leq t \leq t_1, \quad \eta(0, t_1) = L. \end{aligned}$$

4. Ведущие пакеты прикладных программ, доставляющие численное решение проблемы динамики наносов

Существует большое количество пакетов, позволяющих в той или иной мере численно решать проблему транспорта наносов. Мы остановимся на трех пакетах, на наш взгляд, наиболее полно подходящих к решению задачи. Следует отметить, что для успешного их использования необходимо наличие опыта в решении задач по прикладной гидромеханике и в подготовке исходных данных, выборе основных модулей, корректном задании начальных и граничных условий.

LITPASC. Второе название этого пакета — Интегрированная система моделирования и кинетики береговой линии. Разработчиком его является датская фирма DHI, Water and Environment. Он предназначен для моделирования перемещения несвязанных наносов при наличии волн и течения, литорального дрейфа, эволюции береговой линии и профиля пляжей. Пакет имеет графический интерфейс, полностью интегрированный в операционную систему Windows. LITPASC имеет два основных модуля: LITSTR — для вычисления перемещения наносов и LITDRIFT — для расчета вдоль

берегового перемещения наносов и литорального дрейфа. Три дополнительных модуля расширяют функции пакета: LITLINE позволяет рассчитывать изменение береговой линии, LITPROF — изменение поперечного профиля, LITTREN вычисляет отложение наносов в подводных желобах и траншеях. Все изменения можно выполнять в оперативном режиме. Пакет позволяет наносить на карту различные типы гидротехнических сооружений. Возможен динамический вывод промежуточных результатов.

SMS. Название этого пакета является сокращением от Surface-water Modeling System. Текущая версия 9.2. Разработчик — лаборатория окружающей среды (EMRL) из Brigham Young University, USA, в кооперации с Waterways Experiment Station американского Корпуса военных инженеров (USACE-WES) и федеральным Управлением автомагистралей (FHWA). Пакет предназначен для моделирования и анализа движения воды, имеющей свободную поверхность. Имеет, как и предыдущий пакет, полностью графический, интегрированный в операционную систему Windows, интерфейс. Включает восемь основных модулей:

RMA2, NIVEL2D, FESWMS — расчет по двумерным моделям прибрежной циркуляции;

RMA10, CH3D — расчет по трехмерным моделям прибрежной циркуляции;

ADCIRC, M2D, BOUSS2D — расчет по моделям океанической циркуляции;

CGWAVE — интегрирование уравнений рефракции-дифракции и BOUSS2D — интегрирование уравнений Буссинеска; STWAVE — спектральная модель расчета ветровых волн;

RMA4 и SED2D-WES — модели транспорта наносов;

HEC-RAS — одномерная прибрежная модель;

PTM — модель, основанная на лагранжевом подходе.

Модуль RMA2 доставляет конечно-элементное решение уравнений Навье—Стокса для турбулентных потоков с осреднением по числу Рейнольдса. Трение определяется из уравнений Маннинга или Шези. Для расчета турбулентных характеристик используются коэффициенты турбулентной вязкости. Для решения уравнений используется процедура Галёркина. Модуль SED2D-WES позволяет находить решения как стационарных, так и нестационарных задач. Основное уравнение — уравнение конвекции—диффузии.

DELFT-3D. Полное название пакета — Интегрированная база трехмерного моделирования течений, транспорта наносов, волн, качества воды, морфологических и экологических изменений в прибрежных, речных, озерных областях и эстуариях. Разработчик — лаборатория Delft Hydraulics, Нидерланды. Основные модули, используемые при изучении динамики наносов: FLOW, SED, MOR. Так, FLOW — двумерная и трехмерная программы гидродинамического и транспортного моделирования нестационарного движения жидкости и переноса на криволинейных сетках. Гидродинамические характеристики, вычисленные в этом модуле, используются в качестве входных параметров в других модулях. Связь между модулями осуществляется через графический интерфейс пользователя. SED и MOR — модули для вычисления движения наносов, как связанных (глина), так и несвязанных (песок). Первый модуль используется при кратковременных расчетах, когда топографическими изменениями можно пренебречь. Второй — при долгосрочных расчетах, когда нужно учитывать эти изменения. Для расчета транспорта наносов применяется трехмерное уравнение конвекции—диффузии.

Заключение

Дана краткая характеристика теоретических моделей динамики наносов. Приведены некоторые результаты экспериментальных исследований, имеющих своей целью получить надежные оценки заносимости акватории заданного объекта и разработать рекомендации для снижения уровня заносимости до допустимых значений. Рассмотрено решение задач об изменении береговой линии при отложении наносов и об отложении наносов у мола. Приведены основные характеристики трех пакетов прикладных программ для расчета динамики наносов в прибрежной зоне. Приложен подробный список отечественных публикаций, посвященный динамике наносов.

Список литературы

- [1] Айбулатов Н.А. Исследование вдольберегового перемещения песчаных наносов в море. М.: Наука, 1966. 159 с.
- [2] Айбулатов Н.А. Динамика твердого вещества в шельфовой зоне. Л.: Гидрометеиздат, 1990. 271 с.
- [3] Айбулатов Н.А., Артюхов Ю.В. Геоэкология шельфа и берегов Мирового океана. СПб.: Гидрометеиздат, 1993. 304 с.
- [4] Айбулатов Н.А. и др. Геоэкология шельфа и берегов морей России. М.: Ноосфера, 2001. 428 с.
- [5] Айбулатов Н.А. Деятельность России в прибрежной зоне моря и проблемы экологии. М.: Наука, 2005. 364 с.
- [6] Алешков Ю.З. Трансформация поверхностных гравитационных волн в жидкости при медленно изменяющейся глубине // Исследования по упругости и пластичности. 1980. № 13. С. 224–230.
- [7] Алешков Ю.З. Теория волн на поверхности тяжелой жидкости. Л.: Изд-во ЛГУ, 1981. 196 с.
- [8] Алешков Ю.З. Течения и волны в океане. СПб.: Изд-во Санкт-Петербург. ун-та, 1996. 228 с.
- [9] Алешков Ю.З. Распространение примесей в океане // Вест. СПбГУ. Сер. 1. 2001. Вып. 1, № 1. С. 12–20.
- [10] Алешков Ю.З. Изменение береговой линии // Петербургские фрагменты научной картины мира. СПб.: Изд-во РАН СПбНЦ, 2002. С. 19–27.
- [11] Алешков Ю.З. Динамические процессы в прибрежной зоне моря // Вест. СПбГУ. Сер. 1. 2003. Вып. 1, № 1. С. 64–72.
- [12] Анцыферов С.М., Косьян Р.Д. Взвешенные наносы в верхней части шельфа. М.: Наука, 1986. 223 с.
- [13] БЕРЕГА / П.А. Каплин, О.К. Леонтьев, С.А. Лукьянова, Л.Г. Никифоров. М.: Мысль, 1991. 479 с.
- [14] Вечорек В.И. Об использовании мола в качестве наносозадерживающего сооружения // Гидромеханика. 1971. № 19. С. 35–39.
- [15] Вечорек В.И. Переформирование волнами линии берега у поперечного наносоудерживающего сооружения // Гидротехническое строительство. 1981. № 1. С. 33–36.
- [16] Гришанин К.В. Динамика русловых потоков. Л.: Гидрометеиздат, 1979. 311 с.

- [17] Гришин Н.Н. Механика придонных наносов. М.: Наука, 1982. 160 с.
- [18] ДЕВОЛЬСКИЙ В.К., ЗАЙДЛЕР Р., МАССЕЛЬ С. и др. Динамика русловых потоков и литодинамика прибрежной зоны моря. М.: Наука, 1994. 302 с.
- [19] ДИНАМИЧЕСКИЕ процессы береговой зоны моря / Под ред. Р. Д. Косьяна, И. С. Подымова, Н. В. Пыхова. М.: Научный мир, 2003. 326 с.
- [20] ЖУКОВЕЦ А.М. О приближенном моделировании динамики песчаных наносов при волнении // Тр. координац. совещаний по гидротехнике. Л.: Энергия, 1971. Т. 66. С. 77–83.
- [21] ЗЕНКОВИЧ В.П. Динамика и морфология морских берегов. Ч. 1. Волновые процессы. М.; Л.: Морской транспорт, 1946. 496 с.
- [22] ЗЕНКОВИЧ В.П. Основы учения о развитии морских берегов. М.: Изд-во АН СССР, 1962. 710 с.
- [23] ЗНАМЕНСКАЯ Н.С. Донные наносы и русловые процессы. Л.: Гидрометеиздат, 1976. 191 с.
- [24] КАРТВЕЛИШВИЛИ Н.А. Потоки в недеформированных руслах. Л.: Гидрометеиздат, 1973. 279 с.
- [25] КОСЬЯН Р.Д., ПЫХОВ Н.В. Гидрогенные перемещения осадков в береговой зоне моря. М.: Наука, 1991. 280 с.
- [26] КУЗНЕЦОВ С.Ю., СПЕРАНСКИЙ И.С. Расчет движения взвешенных частиц песка в монохроматической волне на мелководье // Океанология. 1985. Т. 25, № 5. С. 780–783.
- [27] ЛЕОНТЬЕВ И.О. Динамика прибойной зоны. М.: Изд-во ИО АН СССР, 1989. 185 с.
- [28] ЛЕОНТЬЕВ И.О. О возможности прогноза штормовых деформаций профиля подводного берегового склона // Океанология. 1991. Т. 31, № 5. С. 735–743.
- [29] ЛЕОНТЬЕВ И.О. Расчет волн, течений и вдольбереговых потоков наносов в прибрежной зоне // Океанология. 1993. Т. 33, № 3. С. 429–434.
- [30] ЛЕОНТЬЕВ И.О. Поперечный транспорт наносов и деформация профиля дна в прибрежной зоне // Океанология. 1994. Т. 34, № 2. С. 287–293.
- [31] ЛЕОНТЬЕВ И.О. Пространственная модель прибрежной морфодинамики, обусловленной штормовым волнением // Океанология. 1995. Т. 35, № 2. С. 275–281.
- [32] LEONT'YEV I.O. Numerical modelling of beach erosion during storm event // Coastal Engineering. 1996. Vol. 29. P. 187–200.
- [33] ЛЕОНТЬЕВ И.О. О динамических изменениях профиля пляжа во время шторма // Океанология. 1997. Т. 37, № 1. С. 136–144.
- [34] LEONT'YEV I.O. Modelling of morphological changes due to coastal structures // Coastal Engineering. 1999. Vol. 38. P. 143–166.
- [35] ЛЕОНТЬЕВ О.К. Геоморфология морских берегов и дна. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1955. 379 с.
- [36] ЛЕОНТЬЕВ О.К. Основы геоморфологии морских берегов. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1961. 418 с.
- [37] ЛОНГИНОВ В.В. Динамика береговой зоны бесприливных морей. М.: Изд-во АН СССР, 1963. 379 с.
- [38] ЛОНГИНОВ В.В. Очерки литодинамики океана. М.: Наука, 1973. 244 с.

- [39] МАКАРОВ К.Н. Динамика берегов в зоне влияния продольных берегозащитных сооружений нетрадиционных конструкций // Гидротехническое строительство. 2002. № 6. С. 28–32.
- [40] ПЫШКИН Б.А., МАКСИМЧУК В.Л., ЦАЙТЦ Е.С. Исследование вдольберегового движения наносов на морях и водохранилищах. Киев: Наук. думка, 1967. 142 с.
- [41] ПЫШКИН Б.А., ЦАЙТЦ Е.С., СОКОЛЬНИКОВ Ю.М. Регулирование вдольберегового потока наносов. Киев: Наук. думка, 1972. 136 с.
- [42] ПЫШКИН Б.А. Динамика берегов водохранилищ. Киев: Наук. думка, 1973. 413 с.
- [43] САФЬЯНОВ Г.А. Береговая зона океана в XX веке. М.: Мысль, 1978. 263 с.
- [44] САФЬЯНОВ Г.А. Геоморфология морских берегов. М. 1996. 400 с.
- [45] СЕЛЕЗОВ И.Т., СИДОРЧУК В.Н., ЯКОВЛЕВ В.В. Трансформация волн в прибрежной зоне шельфа. Киев: Наук. думка, 1983. 208 с.
- [46] СОКОЛЬНИКОВ Ю.Н., ВЕЧОРЕК В.И. Экспериментальное исследование процесса заполнения входящего угла мола // Тр. координац. совещаний по гидротехнике. Л.: Энергия, 1971. № 5. С. 114–117.
- [47] СОКОЛЬНИКОВ Ю.Н. Инженерная морфодинамика берегов и ее приложения. Киев: Наук. думка, 1976. 227 с.

Поступила в редакцию 14 марта 2008 г.