

УДК 551.435.37-551.89(268.46)

**ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ВЗВЕСИ В ОБЛАСТИ ВТОРИЧНОГО
ЗАГРЯЗНЕНИЯ ДОННЫХ ОСАДКОВ В РАЙОНЕ ДАМПИНГА (МОДЕЛЬНЫЕ
РАСЧЕТЫ НА ПОЛИГОНЕ В ЗАЛИВЕ НАХОДКА)**© 2020 г. **И. П. Трубкин¹, И. А. Немировская^{2,*}**¹ ВНИИ охраны окружающей среды (ВНИИ Экология), Москва, Россия² Институт океанологии имени П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия

*E-mail: nemir44@mail.ru

Поступила в редакцию 29.11.2018 г.

После доработки 25.02.2019 г.

Принята к публикации 08.10.2019 г.

Проведен расчет потока наносов с помощью имитационного метода блуждающих частиц-маркеров в водной акватории района дампинга грунта в заливе Находка. При этом учитывалась относительная деформация дна по трехмерной модели течений, ветрового волнения и трансформации взвеси в процессе седиментации. Установлено, что транспорт загрязнения с наибольшей вероятностью происходит в южном направлении в сторону открытой акватории залива. Вынос за пределы границ полигона взвеси составляет до 3.5% массы всего ежемесячно сбрасываемого грунта. Площадь осадка на дне возрастает с увеличением времени действия ветра, а скорость изменения площади захоронения принимает наибольшие значения за первые сутки.

Ключевые слова: дампинг, поток наносов, деформация дна, среднее направление ветра, вторичное загрязнение, залив Находка

DOI: 10.31857/S0435428120020091**ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ**

Из осадочного материала и взвешенных фракций сбрасываемого при дампинге грунта образуется облако взвеси – “мутьевое пятно”, которое может перемещаться с потоком воды и распространяться на некоторое расстояние от места сброса. Во взвешенное состояние обычно переходит не более 2–5% от объема сбрасываемого грунта в зависимости от его гранулометрического состава [1]. Илистые, мелкодисперсные фракции легче всего переходят во взвешенное состояние, имеют меньшую скорость осаждения и дольше удерживаются в толще воды. Скорости осаждения различных частиц в условиях малоподвижного ламинарного потока описывают с помощью формул Стокса и Гончарова [1]. Практически все потоки в море, переносящие осадочный материал, являются турбулентными; ламинарные потоки встречаются очень редко. Поэтому, когда частица попадает в движущийся турбулентный поток, условия ее осаждения изменяются.

В турбулентном потоке существуют силы, которые могут на продолжительное время задержать падение частиц и даже поднять их со дна. Современная теория «турбулентного» движения говорит о том, что скорость в каждой точке потока имеет постоянно меняющиеся величину и направление [2]. Если это направление будет иметь равнодействующую, идущую под некоторым углом вверх, и величина этой равнодействующей окажется достаточной для нейтрализации силы тяжести, то частица будет поддерживаться во взвешенном состоянии. Таким образом, каждая частица в потоке

находится под действием, по крайней мере, двух сил – силы тяжести, направленной вниз, и силы восходящих движений воды в потоке, противодействующей весу частицы. В зависимости от результатов сложения этих двух противоположно направленных сил, частица может опускаться вниз, находиться в нейтральном состоянии или подниматься вверх. Вследствие пульсации скорости турбулентного потока изменяется и вертикальная его составляющая, отчего частицы в таком потоке движутся беспорядочно, криволинейно. Пульсации хорошо соответствуют кривой распределения Гаусса. Вертикальная составляющая меняется от 1/10 до 1/30 от горизонтальной скорости потока [2]. Если ориентироваться на наихудшие для окружающей среды условия (взвешенные частицы рассеиваются на максимальное расстояние и не осаждаются), безопасные для гидробионтов концентрации взвешенного материала могут достигаться только путем разбавления, а не осаждения.

Поведение взвеси при дампинге грунта определяется как физико-химическими свойствами взвеси, так и состоянием морской среды. Скорость растекания взвеси может варьировать в широких пределах и зависит, в основном, от ее физических свойств в данных гидрометеорологических условиях [2]. Деформация и перенос поля загрязнения определяются совместным действием ветра волн и течений в месте нахождения источника взвеси. Практически с момента сброса грунта происходит изменение физико-химических свойств взвеси. При достаточно сильных ветрах и развитом волнении за счет взвешенных веществ формируется внутримассовое загрязнение, дальнейшая судьба которого определяется, в основном, динамической структурой поля течений.

Цель исследования: установить с помощью математического моделирования влияние полигона дампинга грунта на прилегающую акваторию в заливе Находка, провести оценку пространственных характеристик области вторичного загрязнения донных осадков (при разных величинах ветрового волнения оценить потоки наносов и относительную деформацию дна).

ТЕРРИТОРИЯ И МАТЕРИАЛ ИССЛЕДОВАНИЯ

В Приморье с конца 1940-х годов у о-ва Лисий (залив Находка, район № 156) действует полигон дампинга. Здесь согласно [3] при первоначальной глубине 25–35 м насыпан удлиненный холм высотой от 5 до 25 м, длиной свыше 1.5 км и общим объемом около 2–2.5 млн. м³. Объем этого холма равен примерно четверти общего объема выемки грунта в зал. Находка за последние 25 лет [4]. Гранулометрический состав сбрасываемого грунта определяется составом изъятых грунтов при дноуглублении в заливе Петра Великого. Грунт в основном состоит из глинистого ила – 33% от общего объема; гравелистого, крупного, среднего, мелкого, пылеватого песка – 65%; суглинка и текучепластичной глины – 2%.

Результаты изысканий показали, что сбрасываемые грунты имели различный литологический состав и очень часто были насыщены нефтепродуктами, содержали металлом и строительные отходы. Так, в 2008 г. согласно [3] по результатам натуральных исследований и гидрохимического анализа было выявлено множество различных образцов загрязненного металлами и нефтепродуктами грунта. При этом было зафиксировано массивное размещение опасных концентраций токсичных элементов на юго-западной границе полигона. Такой результат показывает, что донные отложения в районе полигона дампинга, обладая большой сорбционной емкостью, аккумулируют в себе вещества различных источников загрязнения.

Анализ геоэкологической обстановки этого полигона показал [5], что сброшенный в выделенной зоне грунт под воздействием волнения и ветровых течений служит источником вторичного загрязнения прилегающей акватории. За счет взмучивания донных осадков в акватории полигона дампинга под воздействием волнения и ветровых течений возможны образование взвеси и ее перенос в другие зоны. После осаждения

взвешенного материала грунты становятся источником вторичного загрязнения водной среды и донных отложений. Поэтому для грунтов полигона характерно загрязнение в количествах, превышающих фоновые значения. Области вторичного загрязнения донных осадков в районе сброса, так и в прилегающей акватории, формируются в качестве постоянных источников загрязнения водной среды на протяжении многих лет.

Облако взвеси при дноуглублении и дампинге в случае малых глубин осаждается согласно [6] на относительно небольшой площади дна. Протяженность факела определяется скоростью течения и скоростью осаждения взвеси. Воздействие сваливаемого грунта сводится к засыпанию донной фауны и не распространяется за пределы 200–300 м от места свала.

С учетом вторичного загрязнения водной среды и донных отложений влияние сваливаемого грунта уже не будет локальным, а будет превышать площадь выделенного участка полигона дампинга. Важно поэтому оценить пространственные характеристики области вторичного загрязнения донных осадков в районе сброса и в прилегающей акватории. Такого рода оценки можно получить, используя данные размыва придонной взвеси в области полигона, а затем с учетом переноса и трансформации за границами области полигона. В современных условиях сделать это можно путем математического моделирования. Практический интерес представляют оценки, характерные для данного природного объекта, влияющие на степень вторичного загрязнения с наибольшей вероятностью. В первую очередь интерес представляют расчеты для наиболее характерной, долгоживущей морской взвеси при средних параметрах вынуждающих сил размыва, переноса и трансформации.

В районе залива Находка за безледный период согласно [7] могут наблюдаться ежемесячно непрерывно на протяжении порядка 7 дней средние ветровые условия со скоростями ветра 5–9 м/с. Представляет интерес оценить за этот период времени перенос и трансформацию вторичного загрязнения донных осадков в районах сброса и в прилегающей к полигону акватории.

МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ

На практике обычно в качестве расчетной сетки выбирают из топографических карт прибрежные прямоугольные участки размерами до 3×3 км, захватывающие район исследования. В результате для каждого из участков могут быть вычислены и построены карты пространственных распределений параметров волн, приливных, волновых и ветровых течений, деформаций рельефа дна и смещений береговой линии.

За начальное положение уровня моря в расчетах реальных штормов принимается его среднемесячное положение (за вычетом экстремальных значений), а расчеты ведутся с момента начала ветра. При расчетах по типовым ветровым ситуациям уровень моря полагается равным среднему по всей акватории. Начальные течения равны нулю.

Общие схемы течений в районе работ строятся на основе гидродинамических расчетов по бароклинным либо баротропным моделям с осреднением входных параметров (плотность, атмосферное давление, ветер) за средний месяц соответствующего сезона. Для поверхностного горизонта расчет течений в районе работ проводится также и по типовым ветровым полям. Коэффициент трения о дно для глубоководной части моря принимается в виде постоянной, равной 2.6×10^{-3} .

Для расчетов применяется полуразнесенная расчетная сетка: в узлах ее задаются глубины моря и рассчитываются значения его уровня, а в центрах ячеек — величины потоков. Такая сетка удобна для определения как переменной глубины моря, так и изменчивости вектора скорости течения.

Оценка характеристик размыва производилась с учетом наиболее типичной морской взвеси со средним диаметр фракций 1.8–20.7 мкм [8] по величине деформаций

Таблица 1. Средние скорости и повторяемость ветра для 8 румбов направлений в районе залива Находка (Японское море) за безледный период [7]

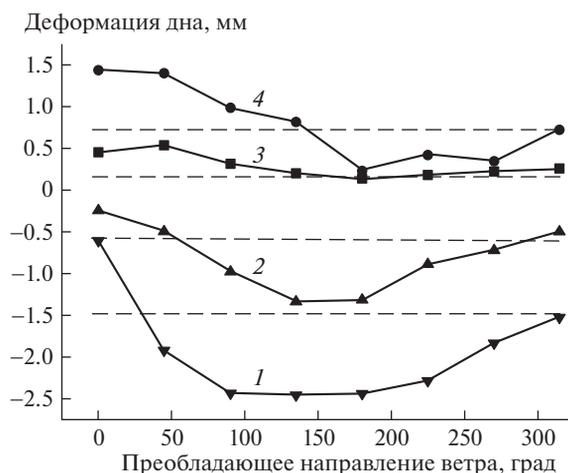
Направления	С	СВ	В	ЮВ	Ю	ЮЗ	З	СЗ
Скорость, м/с	9.0	6.0	5.0	4.8	5.4	6.0	6.2	9.2
Повторяемость, %	18.5	7.6	5.5	6.9	13.1	15.1	11.9	21.5

дна в пределах акватории полигона. При этом нами была использована методика расчета удельного объемного расхода наносов и деформаций дна, основанная на публикациях [10, 11]. Расчеты были выполнены по данным о среднем ветре (табл. 1) для 8 румбов направлений. По выбранным величинам скоростей и направлений ветра были рассчитаны поля течений, ветровых и инфрагравитационных волн, и затем поля расходов наносов, деформаций рельефа дна по методике, изложенной в [12].

При расчетах выполнялись следующие процедуры:

- определения условий начала размыва деформируемого дна;
- оценки постоянных составляющих удельных тангенциальных напряжений;
- оценки тангенциальных напряжений, обусловленных регулярными течениями;
- определения напряжений, обусловленных асимметрией волновых движений;
- определения суммарных средних тангенциальных напряжений;
- определение параметров донных микроформ;
- определение удельного расхода донных и взвешенных наносов;
- оценки составляющих суммарного расхода наносов и деформации рельефа дна.

В результате были получены оценка относительных деформаций дна за 1 сут при среднем ветре различного преобладающего направления (рис. 1) и оценка пространственных характеристик при характерном направлении ветра в районе полигона дампинга (№ 156) залива Находка (рис. 2). Значения размыва дна в каждой точке расчетной области были использованы при последующих расчетах вторичного загрязнения.

**Рис. 1.** Относительная деформация дна (мм) за 1 сут при различном направлении преобладающего среднего ветра.

Значения при эрозии или размыве: 1 – максимальные, 2 – средние; значения при аккумуляции наносов в пределах акватории полигона дампинга (№ 156) залива Находка: 3 – средние, 4 – максимальные.

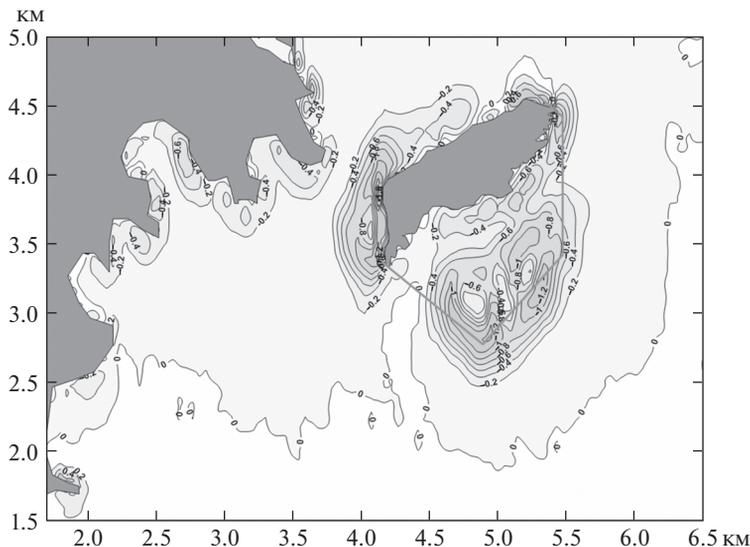


Рис. 2. Относительная деформация дна (мм) за 1 сут при преобладающем среднем ветре, характерном для района полигона дампинга.

Для процесса транспорта наносов характерно их переотложение, когда имеют место два противоположных явления: размыв донных отложений и их аккумуляция. В данном случае при преобладающем среднем ветре, характерном для района полигона дампинга (№ 156) залива Находка, согласно рис. 1 и 2 полученные данные в основном соответствуют условию размыва или эрозии дна. Естественно предположить, что эффект переотложения не может быть исключен, и аккумуляция наносов будет иметь место в последующий момент времени, после взмучивания и образования облака придонной взвеси.

Используемая нами модель переноса основана на системе дифференциальных уравнений Навье—Стокса для вязкой несжимаемой жидкости с учетом условия сохранения массы и количества движения в рассматриваемой области морской акватории. В качестве исходной величины были использованы значения деформаций дна при эрозии или размыве в пределах акватории полигона. Такая модель позволяет выполнить расчет параметров (площади, объема, толщины слоя на дне) зон вероятного вторичного загрязнения донных осадков в районах сброса и в прилегающей акватории.

В большинстве практических случаев можно допустить, что в области за источником загрязнения концентрация взвешенных веществ уменьшается, и загрязняющие взвеси можно рассматривать как пассивную примесь, отдельные фракции которой, во-первых, распространяются независимо друг от друга и, во-вторых, динамически не влияют на фоновое поле скорости жидкости. Оптимальным решением тогда, на наш взгляд, является использование комплекса моделей, позволяющих воспроизвести (имитировать) трансформацию взвеси в водной акватории с учетом режимных характеристик гидрометеорологических полей. Выбор исходных условий в этом случае будет приоритетным и обоснован повторяемостью вынуждающих сил. Этот комплекс может состоять из следующих математических моделей:

- трехмерной динамики течений;
- динамики ветрового волнения;
- трансформации взвеси в водной акватории.

Оценки пространственного распределения взвешенных веществ и их трансформации в настоящее время могут быть получены имитационным методом блуждающих частиц-маркеров [13–15], используемым при расчетах переноса загрязнения в морских водах. В этом методе поле примеси задается совокупностью большого числа отдельных частиц, в каждой из которых содержится по одной условной единице примеси. Количество частиц в единичном квадрате моря определяет концентрацию примеси в данном районе. Частицы участвуют в двух типах движений: они переносятся существующими морскими течениями и совершают флуктуации из-за турбулентных «добавок» к полю этих течений и волнения. Источник примеси может быть задан мгновенным или непрерывно действующим за некоторый период времени. Вес вещества, выбрасываемого в море одновременно или распределенного во времени с известной интенсивностью, пропорционален количеству выпускаемых частиц-маркеров. Координаты маркеров описываются уравнениями:

$$\begin{aligned}\frac{\partial x}{\partial t} &= u_w(x, y, t) + u_p(x, y, t) + u_{pr}(x, y, t) + u'(x, y, t), \\ \frac{\partial y}{\partial t} &= v_w(x, y, t) + v_p(x, y, t) + v_{pr}(x, y, t) + v'(x, y, t), \\ \frac{\partial z}{\partial t} &= w(x, y, t) + w'(x, y, t),\end{aligned}\tag{1}$$

где $u_w, u_p, u_{pr}, v_w, v_p, v_{pr}$ – горизонтальные компоненты скорости среднего переноса примеси, включающие ветровые, постоянные и приливные течения, полученные по измерениям или расчетам, $u'(x, y, t), v'(x, y, t), w'(x, y, t)$ – соответствующие пульсационные “добавки” к средним скоростям, обуславливающие турбулентное рассеяние, w – скорость опускания компонентов примеси под действием силы тяжести.

Система уравнений (1) может быть решена по численной схеме с линейной интерполяцией скоростей течений между узлами расчетной сетки. В работе [14] для оценки точности схемы было проведено сравнение аналитического и численного решения одномерного уравнения без пульсационной добавки. Сравнение показало, что ошибка расчета за двухсуточный интервал времени не превышает 0.5%.

Рассеяние частиц под действием пульсационных скоростей при их расчетах задается случайным вектором u', v' , компоненты которого описываются амплитудами вектора орбитальных скоростей ветрового волнения [12] и амплитудой турбулентного (диффузионного) рассеяния частиц, компоненты которого описываются нормальным законом [15]. Практически в последнем случае такое задание осуществляется численно датчиком случайных чисел с заданной дисперсией. Значение дисперсии определяется данными пульсаций скоростей течений, измеренных в рассматриваемом районе.

При расчетах нами были использованы метеорологические данные возможных скоростей и направлений ветра с различной обеспеченностью для 8 румбов направлений устойчивого среднего ветра, и в качестве источника взвеси данные размыва дна в акватории полигона. По выбранным величинам скоростей и направлений ветра, и батиметрическим данным были рассчитаны поля течений, ветровых и инфрагравитационных волн [12], и затем поля и параметры (площади, объема, толщины слоя) вторично загрязнение донных осадков в районах сброса и в прилегающей акватории.

Хотя обозначенный имитационный метод блуждающих частиц-маркеров весьма прост в понимании выполняемых процедур, однако он приводит к большим затратам времени при вычислениях. Нами поэтому был модифицирован названный метод с учетом ранее известного приема расчета как лагранжево-эйлеров подход Харлоу [13]. Суть подхода заключается в том, что источник взвеси задается набором частиц-маркеров, перемещающихся относительно неподвижной эйлеровой расчетной сетки. Область расчета разбивается эйлеровой сеткой на квадратные ячейки. Элементы взвеси в ячейке представляют собой набор частиц, которые могут свободно перемещаться че-

рез сетку, но не через твердую границу. На первом этапе расчета определяется поле скоростей дрейфа в эйлеровой системе координат. Значения вектора скорости дрейфа отсчитываются от центра ячеек. На втором этапе ведется расчет перемещения частиц, положение которых внутри ячейки определено соответствующими координатами Лагранжа. Скорость каждой частицы находится путем линейной интерполяции между центрами соседних ячеек. Частицы, вышедшие из области через “жидкую” границу, из расчета исключаются. На твердых границах используется условие полного отражения.

Подход, предложенный в свое время Харлоу [13] для решения задач гидродинамики, в этом случае оказался весьма успешным, и в данном случае позволяет существенно ускорить вычисления.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Из полученных данных следует (рис. 3), что морская взвесь со средним диаметром 1.8–20.7 мкм, состоящая из легко размываемых мелкодисперсных фракций суглинка и текуче-пластичной глины, при средних ветровых условиях на выделенном участке полигона дампинга в заливе Находка может переноситься за счет гидродинамических сил за пределы акватории полигона.

Такие условия (при скоростях ветра 5–9 м/с) возникают за безледный период ежемесячно и длятся около семи дней. Полученные расчетные данные показали, что транспорт вторичного загрязнения с наибольшей вероятностью происходит в южном направлении в сторону открытой акватории залива, а в направлении берега – с малой вероятностью. Последнее обстоятельство является существенным, так как оно характеризует малую вероятность опасного вторичного загрязнения на прибрежной территории.

Площадь осадка на дне возрастает с увеличением времени действия ветра и для условия превышения уровня 0.005 мм принимает наибольшие значения (рис. 4, а). Скорость изменения площади для этих же условий принимает также наибольшие значения, особенно за первые сутки периода действия среднего ветра (рис. 4, б).

Объем формируемого осадка на дне (рис. 5, а) при различном условии превышения высоты слоя 0.005–0.5 мм за пределами акватории полигона дампинга возрастает с увеличением времени действия среднего ветра. Скорость изменения объема осадка на дне (рис. 5, б) возрастает за первые четверо суток, а затем уменьшается.

Таким образом, масштабы распространения облака загрязнения (взвеси) при дампинге определяются рядом факторов, среди которых наиболее значимыми являются: скорость переноса, время существования взвеси, ее количество и гранулометрический состав. Например, согласно [16, 17] облака взвеси с концентрацией более 10 мг/л существуют 4–6 сут, а с концентрацией более 100 мг/л – 18–40 ч. Для поля с концентрациями более 1000 мг/л время существования облака составило 14–16 ч. Согласно натурным экспериментам при дампинге грунтов концентрация быстро снижается с удалением от источника поступления. Концентрация взвеси в облаке быстро уменьшается со временем и за 1–1.5 ч и становится меньше 10 мг/л [18–20].

Следует отметить, что толщина слоя засыпки зообентоса за счет змучивания донных осадков, при которой происходит гибель организмов, согласно [21, 22] варьирует от нескольких миллиметров до десятков сантиметров (в зависимости от их размера, морфологических особенностей и приспособления к жизни на донном субстрате). По данным Л.А. Лесникова [23], гибель организмов, погребенных под слоем донных осадков, происходит при толщине последнего, превышающей вертикальные размеры бентосных организмов, и при скорости осадконакопления более 0.5 мм/сут.

В целом полученные данные расчетов отражают картину трансформации облака загрязнения (взвеси) при дампинге. Особый интерес представляют количественные оценки. Так, например, за пределы границ полигона дампинга согласно рис. 5 каждые

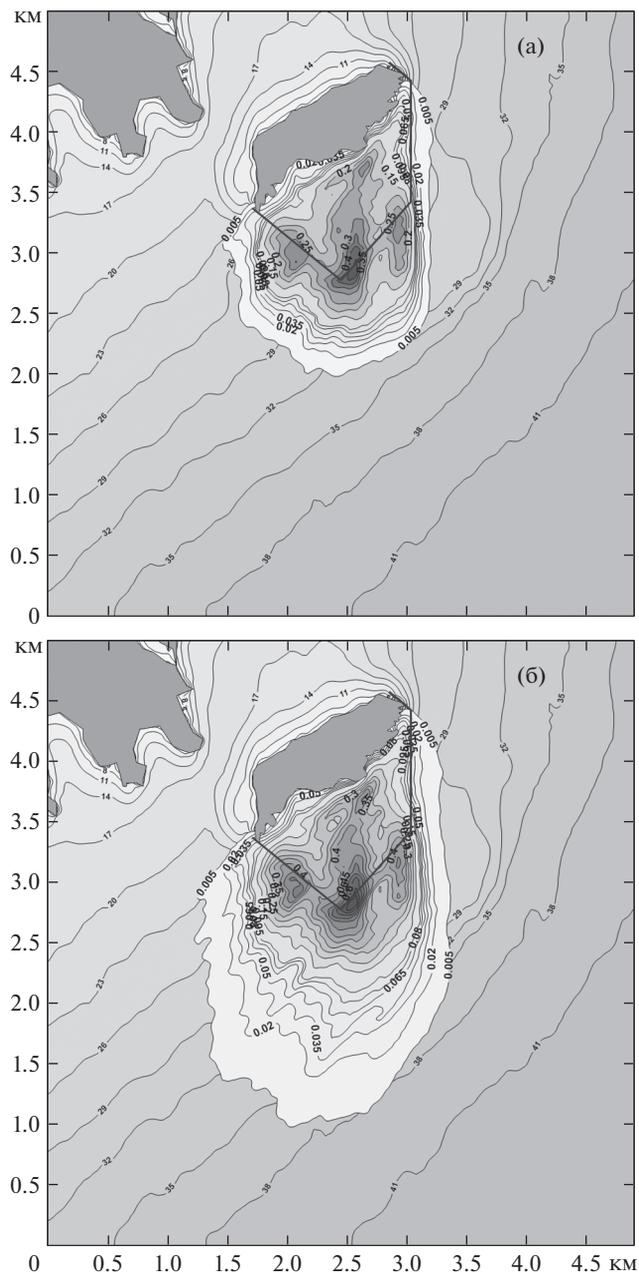


Рис. 3. Высота слоя осадка на дне (мм) через 1 (а), 3 (б), 5 (в) и 7 (г) сут после начала действия среднего ветра, характерного для района полигона дампинга.

сутки при среднем ветре будет переноситься около 100 м^3 взвеси ($700 \text{ м}^3/\text{мес.}$), формируемых в виде осадка на дне. Согласно [5], учтенное поступление твердых осадков в район о-ва Лисий было не менее $20000 \text{ м}^3/\text{мес.}$ за безледный период (250–260 тыс. т/год). Таким образом, за пределы границ полигона дампинга может быть вынесено до 3.5% массы ежемесячно сбрасываемого грунта в разрешенной акватории.

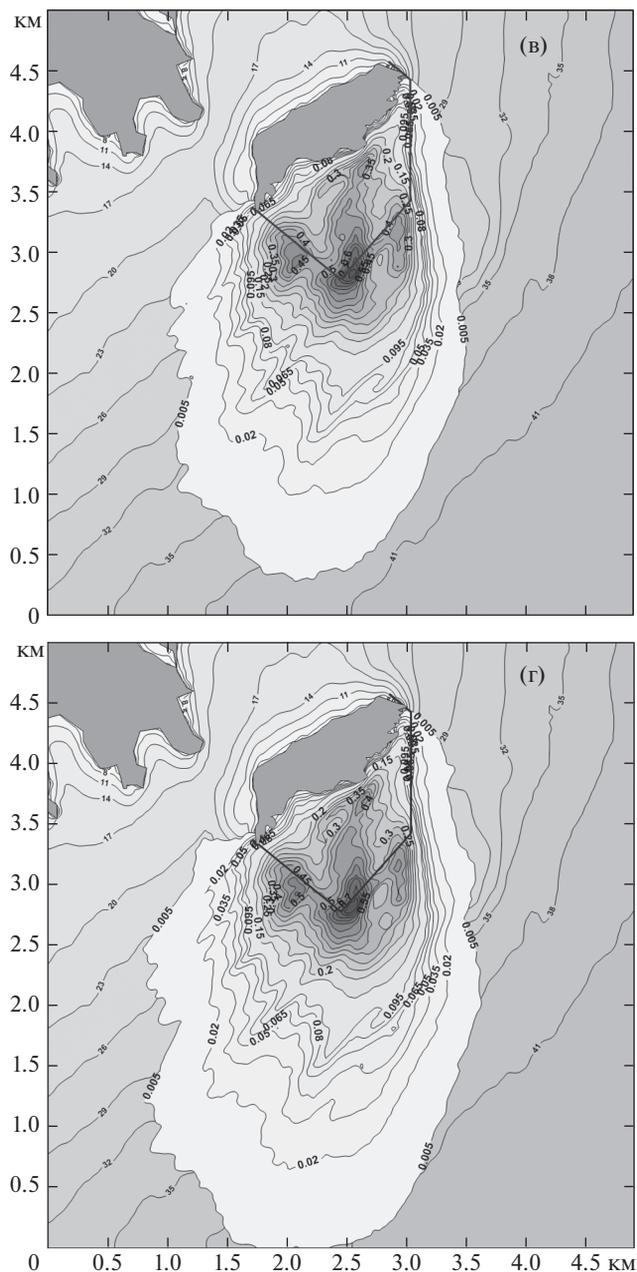


Рис. 3. Окончание.

Использование рассматриваемого подхода позволяет оценить пространственно-временную трансформацию взвешенных веществ за длительный период времени. Кроме того, установлен безопасный уровень воздействия вещества, что необходимо для решения вопросов о допустимости и организации работ, а также выбора обоснованной стратегии контроля качества воды.

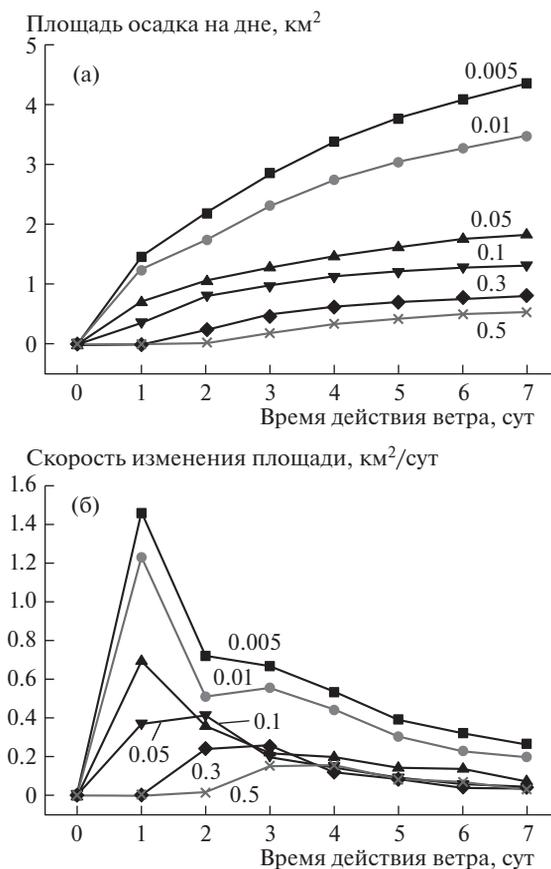


Рис. 4. Площадь осадка на дне (км^2) – (а) и скорость ее изменения ($\text{км}^2/\text{сут}$) – (б).

ВЫВОДЫ

С помощью имитационного метода блуждающих частиц-маркеров в водной акватории района дампинга грунта в заливе Находка по трехмерной модели течений найдены оценки потока наносов и относительной деформации дна, ветрового волнения и трансформации взвеси.

Установлено, что транспорт загрязнения с наибольшей вероятностью происходит в южном направлении в сторону открытой акватории залива, т.е. вероятность опасного вторичного загрязнения на прибрежной территории будет незначительной.

За пределы границ полигона дампинга каждые сутки при среднем ветре будет переноситься около 100 м^3 взвеси ($700 \text{ м}^3/\text{мес.}$), формируемых в виде осадка на дне. Вынос за пределы границ полигона взвеси составляет до 3.5% массы всего ежемесячно сбрасываемого грунта.

Площадь осадка на дне возрастает с увеличением времени действия ветра, а скорость изменения площади принимает наибольшие значения за первые сутки времени действия ветра.

Объем формируемого осадка на дне за пределами акватории полигона дампинга возрастает с увеличением времени действия среднего ветра, а скорость изменения объема осадка на дне – за первые четверо суток, а затем уменьшается.

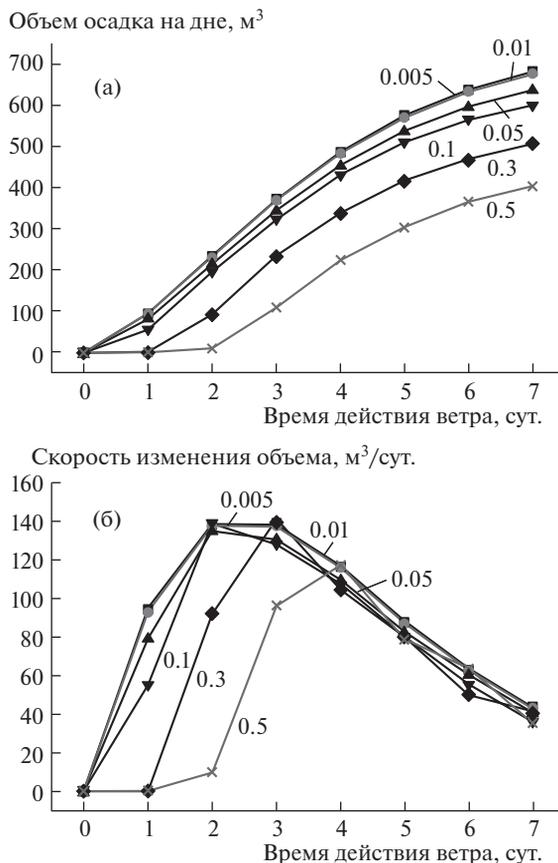


Рис. 5. Объем осадка на дне (м^3) – (а) и скорость его изменения ($\text{м}^3/\text{сут.}$) – (б).

Полученные результаты и метод математического моделирования могут быть использованы в оперативных целях в различных акваториях, где происходит дампинг грунта.

БЛАГОДАРНОСТИ

Результаты исследований получены в рамках государственного задания (тема № 0128-2019-0011), обобщение результатов и подготовка к публикации – при поддержке РФФ проект 19-17-0034).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лисицын А.П. Процессы современного осадкообразования в Беринговом море. М.: Наука, 1966. 574 с.
2. Михайлова Н.А. Перенос твердых частиц турбулентными потоками воды. Л.: Гидрометеоздат, 1966. 234 с.
3. Жариков В.В., Преображенский Б.В., Лебедев А.М. Геоэкологическое состояние полигона дампинга грунта у острова Лисий (залив Находка) // Вестн. ДВО РАН. 2011. № 2. С. 88–97.
4. Наумов Ю.А. Антропогенез и экологическое состояние геосистемы прибрежно-шельфовой зоны залива Петра Великого Японского моря. Владивосток: Дальнаука, 2006. 300 с.
5. Жариков В.В. Влияние дампинга на геоэкологическое состояние залива Находка // География и природные ресурсы. 2013. № 4. С. 37–45.

6. Айбулатов Н.А., Артюхин Ю.В. Геоэкология шельфа и берегов Мирового океана. СПб.: Гидрометеиздат, 1993. 304 с.
7. Российский морской регистр судоходства. Справочные данные по режиму ветра и волнения Японского и Карского морей. СПб. 2009. 356 с.
8. Кравчишина М.Д. Взвешенное вещество Белого моря и его гранулометрический состав. М.: Науч. мир, 2009. 264 с.
9. Великанов Н.Л., Наумов В.А., Примак Л.В. Осаждение частиц взвесей в воде // Механизация строительства. 2013. № 7. С. 44–48.
10. Van Rijn L.C. Sediment transport, part I: bed load transport, part II: suspended transport, part III: bed forms and alluvial roughness // J. Hydraul. Eng. 1984. Vol. 110. No. 12. P. 1733–1754.
11. Михинов А.Е. Динамика наносов в морской береговой зоне // Гидрология и гидродинамика шельфовой зоны Черного моря. Киев: Наук. думка, 1991. С. 158–176.
12. Трубкин И.П. Ветровое волнение (взаимосвязи и расчет вероятностных характеристик). М.: Науч. мир, 2007. 264 с.
13. Harlow F.H. Numerical calculation of time-dependent viscous incompressible flow / F.H. Harlow, J.E. Welch // Phys. Fluids. 1965. Vol. 8. P. 2182–2189.
14. Филиппов Ю.Г. Численное исследование колебаний уровня и течений северной части Каспийского моря при различных значениях его фонового уровня // Водные ресурсы. 1997. Т. 24. № 4. С. 424–429.
15. Озмидов П.В. Диффузия примесей в океане. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 278 с.
16. Wilber D.H. and Clark D.G. Biological effects of suspended sediments: a review of suspended sediment impacts on fish and shellfish with relation to dredging activities in estuaries // North American journal of fisheries management. 2001. Vol. 21. P. 855–875.
17. Nightingale B. and Simenstad C. Dredging activities: Marine Issues // White paper, Washington department of fish and wildlife. Washington department of ecology, Washington department of transportation. 2001. 119 p.
18. Hayes D.F. Guide to selecting a dredge for minimizing resuspension of sediment. Effects of dredging. Technical Notes EEDP–09–01, Army engineer waterways experiment station, Vicksburg, MS. 1986. 8 p.
19. Herbich J.B. and Brahme S.B. Literature review and technical evaluation of sediment resuspension during dredging, Contract Report HL–91–1, prepared for the Department of the Army, U.S. Army corps of engineers. Washington, D.C. 1991. 40 p. <http://www.coastal.ca.gov/sediment/Lit-ResuspendedSediments.pdf>
20. Collins M.A. Dredging-induced near-field resuspended sediment concentrations and source strengths // Miscellaneous Paper D-95-2, US Army engineer waterways experiment station. 1995. 299 p. <http://el.erdc.usace.army.mil/elpubs/pdf/mpd-95-2/mpd952.pdf>
21. Ващенко П.С. Изучение влияния засыпки грунтом на выживаемость зообентосных организмов Кольского залива // Мат-лы XXVIII конф. молодых ученых «Гидробиологические и экосистемные исследования морей европейского Севера». Мурманск. 2010. С. 23–39.
22. Иванова В.В. Экспериментальное моделирование заваливания зообентоса при дампинге грунтов // Тр. ГосНИОРХ. 1988. Вып. 285. С. 107–113.
23. Лесников Л.А. Влияние перемещения грунтов на рыбохозяйственные водоемы // Тр. ГосНИОРХ. 1986. Вып. 255. С. 11–17.

The spatial variability of secondary pollution of bottom sediments in the dumping area (model calculations of polygon in the Nakhodka Bay)

I. P. Trubkin^a and I. A. Nemirovskaya^{b,#}

^a All-Russian Scientific Research Institute of Ecology, Moscow, Russia

^b Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow, Russia

[#] E-mail: nemir44@mail.ru

The sediment flow was calculated using the simulation method of wandering marker particles in the water area of the sediment dumping area in the Nakhodka Bay. The relative deformation of the bottom according to the three-dimensional model of currents, wind waves and suspension transformation in the process of sedimentation were taken into account. It was established that the transport of pollution is most likely to occur in a southerly direction towards the open water area of the bay. Carrying out beyond the boundaries of the landfill of the suspension is up to 3.5% of the mass of the total monthly discharged sediments. The sed-

imentation area on the bottom increases with increasing duration of wind and the rate of change of the burial area reaches the greatest values in the first day.

Keywords: dumping, sediment flow, bottom deformation, average wind direction, secondary pollution, Nakhodka Bay

ACKNOWLEDGEMENTS

The research results were obtained in the framework of the state task (no. 0128-2019-0011), generalization of the results and preparation for publication—with the support of the Russian Science Foundation (project 19-17-0034).

REFERENCES

1. Lisitsyn A.P. *Protsessy sovremennogo osadkoobrazovaniya v Beringovom more* (Processes of modern sedimentation in the Bering Sea). M.: Nauka (Publ.), 1966. 574 p.
2. Mikhailova N.A. *Perenos tverdykh chastits turbulentnymi potokami vody* (Solid particle transport by turbulent water flows). L.: Gidrometeoizdat (Publ.), 1966. 234 p.
3. Zharikov V.V., Preobrazhenskii B.V., and Lebedev A.M. *Geoekologicheskoe sostoyanie poligona dumpinga grunta u ostrova Lisii (zaliv Nakhodka)* (Geoecological condition of the dumping ground near the island of Lisii (Nakhodka Bay)). *Vestnik DVO RAN*. 2011. No. 2. P. 88–97. (in Russ.)
4. Naumov Yu.A. *Antropogenez i ekologicheskoe sostoyanie geosistemy pribrezhno-shel'fovoi zony zaliva Petra Velikogo Yaponskogo morya* (Anthropogenesis and ecological state of the geosystem of the coastal shelf zone of Peter the Great Bay, Sea of Japan). Vladivostok: Dal'nauka (Publ.), 2006. 300 p.
5. Zharikov V.V. *Vliyaniye dumpinga na geoekologicheskoe sostoyanie zaliva Nakhodka* (Impact of dumping on the geoecological state of Nakhodka Bay. Geography and natural resources). *Geografiya i prirodnye resursy*. 2013. No. 4. P. 37–45. (in Russ.)
6. Aibulatov N.A. and Artyukhin Yu.V. *Geoekologiya shel'fa i beregov Mirovogo okeana* (Geoecology of the shelf and shores of the World Ocean). SPb.: Gidrometeoizdat (Publ.), 1993. 304 p.
7. Russian Maritime Register of Shipping. *Rossiiskii morskoi registr sudokhodstva. Spravochnye dannye po rezhimu vetra i volneniya Yaponskogo i Karskogo morei* (Reference data on the mode of wind and sea. Japanese and Kara Seas). SPb. 2009. 356 p.
8. Kravchishina M.D. *Vzveshennoe veshchestvo Belogo morya i ego granulometricheskii sostav* (Suspended matter of the White Sea and its granulometric composition). M.: Nauchnyi Mir (Publ.), 2009. 264 p.
9. Velikanov N.L., Naumov V.A., and Primak L.V. *Osazhdenie chastits vzvesei v vode* (Deposition of suspended particles in water). *Mekhanizatsiya stroitel'stva*. 2013. No. 7. P. 44–48. (in Russ.)
10. Van Rijn L.C. Sediment transport, part I: bed load transport, part II: suspended transport, part III: bed forms and alluvial roughness. *J. Hydraul. Eng.* 1984. Vol. 110. No. 12. P. 1733–1754.
11. Mikhinov A.E. *Dinamika nanosov v morskoi beregovoi zone* (Dynamics of sediment in coastal zone). *Gidrologiya i gidrodinamika shel'fovoi zony Chernogo morya*. Kiev: Nauka (Publ.), 1991. P. 158–176. (in Russ.)
12. Trubkin I.P. *Vetrovoe volnenie (vzaimosvyazi i raschet veroyatnostnykh kharakteristik)* (Wind waves (interrelations and calculation of probability characteristics)). M.: Nauchnyi Mir (Publ.), 2007. 264 p.
13. Harlow F.H. and J.E. Welch. *Numerical calculation of time-dependent viscous incompressible flow*. *Phys. Fluids*. 1965. Vol. 8. P. 2182–2189.
14. Filippov Yu.G. *Chislennoe issledovanie kolebaniy urovnya i techeniy severnoi chasti Kaspiiskogo morya pri razlichnykh znacheniyakh ego fonovogo urovnya* (Modeling the circulation and transport of oil spills in the Black Sea). *Vodnye resursy*. 1997. Vol. 24. No. 4. P. 386–391. (in Russ.)
15. Ozmidov R.V. *Diffuziya primesei v okeane* (Diffusion of impurities in the ocean). L.: Gidrometeoizdat (Publ.), 1986. 278 p.
16. Wilber D.H. and Clark D.G. Biological effects of suspended sediments: a review of suspended sediment impacts on fish and shellfish with relation to dredging activities in estuaries. *North American journal of fisheries management*. 2001. Vol. 21. P. 855–875.
17. Nightingale B. and Simenstad C. Dredging activities: Marine Issues. White paper, Washington department of fish and wildlife. *Washington department of ecology*. Washington department of transportation. 2001. 119 p.
18. Hayes D.F. Guide to selecting a dredge for minimizing resuspension of sediment. Effects of dredging. Technical Notes EEDP–09–01. *Army engineer waterways experiment station*. Vicksburg. MS. 1986.
19. Herbich J.B. and Brahme S.B. Literature review and technical evaluation of sediment resuspension during dredging. Contract Report HL–91–1, prepared for the Department of the Army, U.S. Army

- corps of engineers. Washington, D.C. 2003. 40 p. <http://www.coastal.ca.gov/sediment/Lit-ResuspendedSediments.pdf>
20. Collins M.A. Dredging-induced near-field resuspended sediment concentrations and source strengths. Miscellaneous Paper D-95-2. US Army engineer waterways experiment station. 1995. 299 p. <http://el.erdc.usace.army.mil/elpubs/pdf/mpd-95-2/mpd952.pdf>
 21. Vashchenko P.S. *Izuchenie vliyaniya zasypki gruntom na vyzhivaemost' zoobentosnykh organizmov Kol'skogo zaliva* (Study of the influence of filling with soil on the survival of zoobenthos organisms of the Kola Bay). *Proceedings of the XXVIII Conference of Young Scientists "Hydrobiological and Ecosystem Studies of the Seas of the European North"*. Murmansk. 2010. P. 23–39. (in Russ.)
 22. Ivanova V.V. *Eksperimental'noe modelirovanie zavalivaniya zoobentosa pri dampinge gruntov* (Experimental modeling of zoobenthos collapse during soil dumping). *Trudy GosNIORKh*. 1988. Vol. 285. P. 107–113. (in Russ.)
 23. Lesnikov L.A. *Vliyanie peremeshcheniya gruntov na rybokhozyaystvennyye vodoemy* (The impact of soil movement on fisheries reservoirs). *Trudy GosNIORKh*. 1986. Vol. 255. P. 11–17. (in Russ.)