

В.А. Царев

ВЛИЯНИЕ ШТОРМОВОГО ВОЛНЕНИЯ НА РЕЛЬЕФ МЕЛКОВОДНОЙ ОБЛАСТИ КУРОРТНОГО РАЙОНА САНКТ-ПЕТЕРБУРГА

V.A. Tsarev

THE INFLUENCE OF STORM WAVES ON THE RELIEF OF THE RESORT DISTRICT OF ST. PETERSBURG

Представлена модель литодинамических процессов в прибрежной зоне моря, обусловленных влиянием штормового волнения. Обсуждаются полученные с помощью модели результаты исследования влияния штормового волнения на процессы формирования особенностей рельефа дна в прибрежной зоне Курортного района СПб.

Ключевые слова: модель, литодинамические процессы, прибрежная область моря, влекомые наносы.

The model of lithodynamic processes due to the influence of storm waves in the coastal area is presented. It is discussed the obtained results of the with a model study of the effect of storm waves on the formation of the bottom topography in the coastal zone Resort District of Saint Petersburg.

Key words: model, lithodynamic processes, coastal sea, sediment transport

Проведенное в последнее время сотрудниками ВСЕГЕИ детальное исследование рельефа дна и состава грунта в прибрежной зоне Курортного района СПб позволило выделить многие важные особенности, включая наличие террасы, присутствие песчаных валов, пересечение террасы узкими желобами и т.д. Обнаружены тенденции изменения некоторых особенностей рельефа дна. В частности, установлено, что происходит уменьшение ширины подводной площадки террасы в окрестности Зеленогорска [5,6]. В то же время отсутствует целостное представление о механизме формирования выделенных особенностей рельефа дна для указанного региона. Это делает актуальным разработку модели литодинамических процессов в данном регионе, что поможет в изучении механизма формирования подводного рельефа дна данного региона. В качестве первого шага предлагается модель формирования морского дна в указанном регионе под влиянием волновых потоков влекомых наносов.

Используемая модель включает систему уравнений, описывающих: а) волновое поле, образующееся в результате распространения через морскую границу ветрового волнения, соответствующего штормовому ветру заданной обеспеченности, б) волновые и гравитационные потоки влекомых наносов и в) изменение рельефа морского дна, связанное с дивергенцией и конвергенцией влекомых наносов.

Для расчета трансформации в расчетной области приходящего через жидкую границу ветрового волнения используется система уравнений, в которой учитывает-

ся возможность того, что на некоторых участках области волны могут не соответствовать условиям длинных волн. В данном случае исходная система уравнений имеет следующий вид:

$$\frac{\partial u_0}{\partial t} = -g \frac{\partial \xi}{\partial x} - r u_0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial v_0}{\partial t} = -g \frac{\partial \xi}{\partial y} - r v_0, \quad (2)$$

$$\frac{\partial u_0}{\partial x} + \frac{\partial v_0}{\partial y} = -\frac{k}{th(kH)} \frac{\partial \xi}{\partial t} + w_0 (1 + \sin(\sigma t)), \quad (3)$$

где u_0, v_0 – волновые скорости волновых течений у поверхности моря; ξ – волновое возмущение уровня свободной поверхности; x, y – пространственные координаты; t – время; r – коэффициент придонного трения; g – ускорение свободного падения; k – волновое число; σ – угловая частота; w_0 – амплитуда фиктивного источника, используемого для задания поступления в область волн.

Скорости волновых течений у дна находятся из соотношения:

$$u_H = u_0 \frac{1}{ch(kH)}. \quad (4)$$

На жидких границах используется условие свободного излучения. На твердой границе – условие непротекания. Распространение волнения через верхнюю границу формируется путем задания вблизи границы источника переменной интенсивности (w_0), входящих в уравнение (3). Для учета процессов разрушения волн вблизи береговой черты в полосе шириной 25 м задавалось повышенное значение коэффициента придонного трения. Использование данного условия приводило к уменьшению амплитуды отраженных от берега волн. Это обеспечивало сохранение прогрессивного характера поступающего волнения. В противном случае при сложении прямого и отраженного волнений формировались стоячие волны. Интенсивность источников у границы подбиралась таким образом, что амплитуда поступающего волнения соответствовала амплитуде ветрового волнения заданной обеспеченности. Волновое возмущение находилось выше уровня невозмущенной морской поверхности. Известно, что ветровое волнение не является симметричным относительно невозмущенной поверхности. Гребни волн обычно находятся на большем расстоянии от невозмущенной поверхности, чем от их подошвы, что проявляется в формировании волнового нагона. Максимальные скорости волновых течений использовались при расчетах потоков влекомых наносов.

Рельеф морского дна формируется под влиянием дивергенции потоков влекомых наносов, включающих две составляющие. Первая составляющая потоков обусловлена касательным напряжением трения, формирующимся придонными скоростями волновых течений. Вторая – гравитационная составляющая, формируется под влиянием наклона поверхности морского дна. Волновая составляющая находится из соотношения Шильдса [2-4]

$$q_w = 4\pi\psi_{\max}^3 W_D, \quad (5)$$

где q_w – волновой поток влекомых наносов; W_D – гидравлическая крупность частиц грунта; ψ_{\max} – максимальное значение параметра Шильдса, определяемое через максимальную величину донного волнового касательного напряжения (τ_H)

$$\psi_{\max} = \frac{\tau_H}{\varphi g D \rho^*}, \quad (6)$$

где ρ – плотность воды; g – ускорение свободного падения; ρ_s – плотность частиц грунта; $\rho^* = \left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1\right)$.

Составляющие τ_H рассчитываются по формуле

$$\tau_{Hx} = c\rho|U|u, \quad (7)$$

где $|U|$ – модуль скорости волнового течения; u, v – составляющие скорости волновых течений.

Рассчитанные волновые скорости сопоставляются с предельной скоростью u_c , превышение которой является необходимым условием начала движения грунта.

$$u_c = K_u \rho^* g \frac{D}{W}, \quad (8)$$

где K_u – коэффициент, учитывающий шероховатость наносов; D – диаметр частиц донного грунта; W – их гидравлическая крупность; ρ_s, ρ – плотность грунта и воды соответственно.

Гравитационный поток влекомых наносов рассчитывается с помощью следующего соотношения

$$q_g = -c_d \nabla H_d, \quad (9)$$

где ∇H_d – наклон динамического профиля морского дна; c_d – константа

При определении константы c_d используется допущение, что на стадии формирования динамического волнового профиля достигается равенство для волновых (направленных к берегу) и гравитационных (направленных по наклону дна) потоков

$$q_g + q_w = 0, \quad (10)$$

где q_g, q_w – средние для динамического профиля гравитационный и волновой потоки влекомых наносов.

Подставляя (9) в (10), находим выражение для c_d

$$c_d = \frac{q_w}{\nabla H_d}. \quad (11)$$

При достижении динамического равновесия наклон рельефа дна соответствует наклону профиля динамического равновесия

$$\nabla H_d = \text{tg}\phi_{cr}, \quad (12)$$

где $\text{tg}\phi_{cr}$ – наклон профиля динамического равновесия.

Наклон профиля динамического равновесия морского дна может быть рассчитан по характеристикам волнения заданной обеспеченности с помощью эмпирического соотношения [1]

$$\text{tg}\phi_{cr} = \frac{\text{tg}\phi_e}{1 + \ln\left(\frac{1}{\gamma_d} \cdot \frac{h_{sur}}{D} \cos^2\theta_{cr}\right)}, \quad (13)$$

где θ_{cr} – угол между нормалью к берегу и направлением распространения волнения на изобате их первого обрушения; $\text{tg}\phi_e$ – крутизна естественного откоса днообразующего грунта; D – средневзвешенный диаметр частиц грунта, h_{sur} – высота волнения на изобате первого обрушения, γ_d – крутизна исходной волны до подхода к зоне обрушения.

Расчет изменения рельефа морского дна под влиянием волновых потоков влекомых наносов выполняется с помощью уравнения

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(q_{wx} + c_d \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(q_{wy} + c_d \frac{\partial H}{\partial y} \right), \quad (14)$$

где q_{wx}, q_{wy} – составляющие волновых потоков влекомых наносов.

На суше величина q_w считается равной нулю. На морской границе области используется условие равенства нулю дивергенции потока влекомых наносов.

С помощью модели исследовались литодинамические процессы в прибрежной зоне Курортного района СПб, возникающие под влиянием штормового волнения различной обеспеченности, а также проведены расчеты обусловленного этими процессами возможного изменения рельефа дна. С учетом натуральных данных при расчетах принималось, что придонный грунт, сложен из песка крупностью 0.5 мм. С помощью стандартных методик [4] были найдены характеристики ветровых волн для южного штормового ветра 0,14 % и 30 % обеспеченности. Для первого случая высота волн составила 2 м, для второго -0.5 м.

При моделировании прибрежная зона Курортного района СПб представлена сеточной областью размером 100x36 расчетных узлов. Из волновой части модели рассчитывались характеристики установившегося волнового поля и соответствующие ему составляющие скорости максимальных придонных волновых течений, по которым рассчитывались составляющие придонного касательного напряжения трения. Придонное трение использовалось для расчета потоков влекомых наносов и распределения толщины слоя накопления или эрозии донного грунта. При расчете гравитационных потоков грунта учитывалось фактическое распределение глубин, представленное на рис. 1, построенное нами по данным гидроакустической съемки, проведенной в 2005 г. ВСЕГЕИ [6].

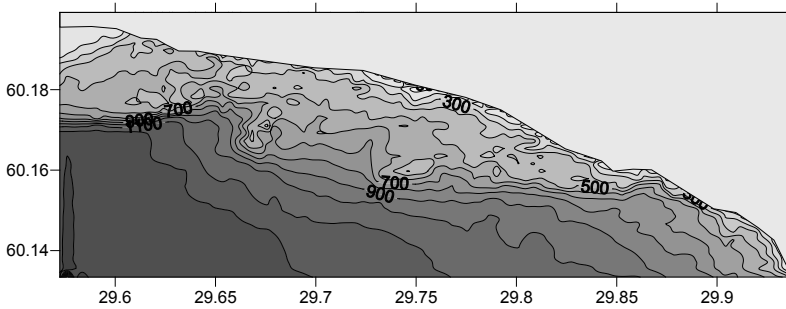


Рис. 1. Распределение глубин (см) в прибрежной зоне Курортного района СПб по результатам съемки

Из-за большого размера области размер ячейки сеточной области составил 210 м, что превышает длину ветровой волны с периодом 5 с. Чтобы сохранить возможность моделирования процесса формирования волнового поля в расчетной области, для волн задавался период 50 с. Это позволяло получить волны с длиной, превышающей шаг сеточной области.

При моделировании литодинамических процессов, обусловленных южным штормовым волнением, задавалось поступление через южную границу области волнения высотой амплитудой 2 м. По расчетам основные изменения рельефа дна, обусловленные влиянием южного штормового волнения, произошли на участках в окрестности внешней границы верхней платформы террасы, где отмечаются резкие изменения наклона дна, что показано на рис. 2.

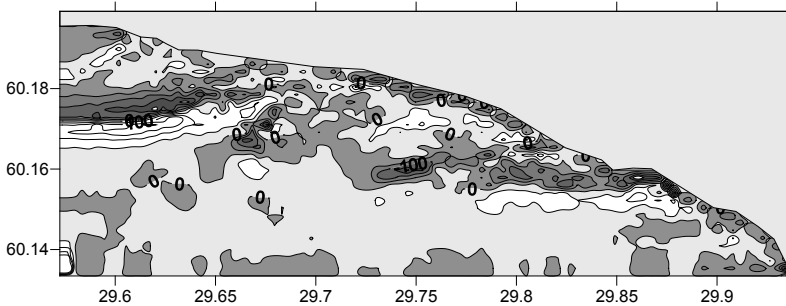


Рис. 2. Изменение глубины (см) морского дна после действия южного штормового волнения продолжительностью 10 суток

За счет этого формируется значительная неоднородность гравитационных потоков влекомых наносов. На склоне террасы за краем платформы величины гравитационных потоков оказалась существенно больше, чем на платформе ближе к берегу. В результате дивергенции потоков отмечается эрозия грунта и увеличение глубины у края верхней площадки террасы, что соответствует процессу ее размыва и уменьшения ширины. На склоне террасы в области уменьшения наклона дна формируется конвергенция потоков и накопление грунта. В непосредственной близости с береговой чертой переноса грунта не происходит. Это означает, что в мелководной части прибрежной зоны сформировавшийся наклон дна близко соответствует динамическому профилю.

В результате этого гравитационные потоки уравниваются волновыми потоками. Представленные результаты расчетов получены для условия непрерывного воздействия штормового волнения в течение 10 суток. Для волнения обеспеченностью 0,14 % это соответствует совокупному воздействию данного волнения за период порядка 70 лет.

При исследовании возможного влияния волнения 30 %-ной обеспеченности задавалось волнение высотой 0,5 м. При этом оказалось, что формирующееся при этом волновое волнение способно привести к переносу грунта лишь в области с глубинами менее 4 м. Такая область ограничивалась расположенным вблизи берега участком верхней платформы террасы. Соответственно потоки влекомых наносов на границе между площадкой террасы и склоном не образовывались. Такие потоки образовывались лишь вблизи кромки береговой черты. Величина таких потоков оказалась на порядок меньше, чем в предыдущем случае, и формирующиеся за счет них изменения рельефа дна оказались минимальны, что отмечается на рис. 3.

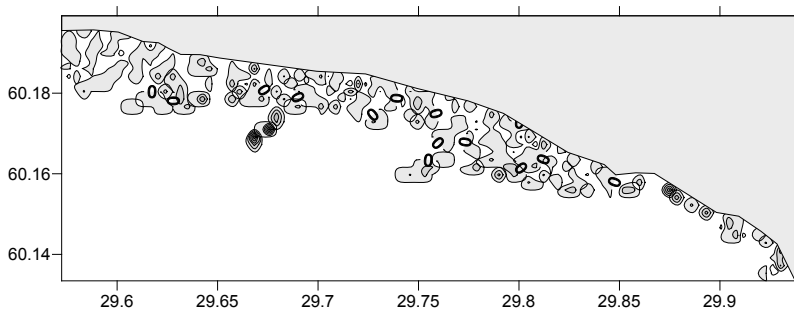


Рис. 3. Изменение глубины(см) морского дна после действия волнения южного направления 30% обеспеченности продолжительностью 10 суток

Следует отметить, что представленные результаты, соответствующие непрерывному действию волнения в течение 10 суток при 30 %-ной обеспеченности соответствуют примерно 30 суткам физического времени.

Литература

1. *Леонтьев И.О.* Прибрежная динамика: волны, течения, потоки наносов. - М.: Геос., 2001, -272 с.
2. *Мартынов С.Д., Рябченко В.А., Рыбалко А.Е.* Моделирование процесса взмучивания донных осадков в Невской губе // Уч. зап. РГГМУ, 2010, № 20, с. 13-26.
3. *Леонтьев И.О.* Бюджет наносов и прогноз развития морского берега // *Океанология*, 2008, т. 48, № 3, с. 467-476.
4. *Глуховский Б.Х., Крылов Ю.М.* (ред.) Руководство по расчету параметров ветровых волн 1969. - Ленинград: Гидрометеорологическое издательство. — 136 с.
5. *Рябчук Д.В., Спиридонов М.А., Сухачева Л.Л., Жамойда В.А., Нестерова Е.Н.* Рельеф, геологическое строение и экзогенные геологические процессы береговой зоны Курортного района Санкт-Петербурга// *Региональная геология и металлогения*, 2008, № 36, с.109-120.
6. *Спиридонов М.А., Рябчук Д.В., Орвику К.К., Сухачева Л.Л., Нестерова Е.Н., Жамойда В.А.* Изменение береговой зоны восточной части Финского залива под воздействием природных и антропогенных факторов// *Региональная геология и металлогения*, № 41, 2010, с.107-118