

УДК 551.465

# ИССЛЕДОВАНИЕ ФАКТОРОВ ДИНАМИКИ НАНОСОВ В МОРСКИХ ШЕЛЬФОВЫХ ЗОНАХ С ЦЕЛЬЮ ОПТИМИЗАЦИИ ИНЖЕНЕРНЫХ РАСЧЕТОВ

А. Г. МАРЧЕНКО

*Институт гидромеханики НАН Украины, Киев**Получено 15.11.2008*

Настоящая работа направлена на поиск коррелятивных связей характеристик транспорта наносов в шельфовых морских зонах с параметрами ветровых волн. В качестве основы для оценки динамики наносов в прибрежной зоне моря использованы результаты работы В. И. Иванова и А. Е. Михинова, полученные путем аналитических и численных исследований и подтвержденные многочисленными лабораторными и натурными данными. В результате предложенной автором оригинальной параметризации транспорта наносов получены обобщающие зависимости удельных расходов взвешенных наносов от удельной энергии волн. Даны расчетные формулы, значительно сокращающие трудоемкость вычислений. Точность расчетов по предлагаемой методике и по рекомендациям работы В. И. Иванова и А. Е. Михинова практически совпадают.

Робота спрямована на пошук кореляційних зв'язків характеристик транспорту наносів у шельфових морських зонах з параметрами вітрових хвиль. Як основу для оцінки динаміки наносів в прибережній зоні моря використано результати роботи В. І. Іванова і А. Е. Міхінова, отримані шляхом аналітичних та чисельних досліджень і підтвержені чисельними лабораторними та натурними даними. В результаті запропонованої автором оригінальної параметризації транспорту наносів отримана узагальнена залежність питомих витрат зважених наносів від питомої енергії хвиль. Приведені розрахункові формули, які дозволяють максимально скоротити трудомісткість обчислювань. Точність розрахунків за запропонованою методикою і за рекомендаціями роботи В. І. Іванова і А. Е. Міхінова практично збігаються.

This research work is aimed to find out the correlative connections that characterize the drift traffic in shelf seashore, including the affect wind waves. The acquisition of drift dynamics on the seashore zone is based on the result of the work V. I. Ivanov and A. E. Mikhinov confirmed by numerous lab and natural data. The author propose the original method of the parameterization for the drift traffic that generalized the interconnections between the specific flow rate of the suspended drift and the specific wave power. The suggested formulas shorter the time for calculations significantly. The accuracy of calculations by the method suggested and by recommendations (see work V. I. Ivanov and A. E. Mikhinov) practically coincide.

## ВВЕДЕНИЕ

В связи с увеличивающимися масштабами освоения береговых территорий и шельфовых зон морей и океанов возрастает и актуальность исследования гидродинамических процессов в прибрежных акваториях в штормовые периоды [1, 2]. Одной из важнейших задач является исследование транспорта наносов, обусловленного различными видами волновых и квазистационарных движений водных масс в мелководной зоне штормового моря [3 – 8].

Для адекватного представления сложных гидродинамических процессов, связанных с перемещением наносов, необходимо учитывать нестационарность турбулентных потоков и формирование в этих условиях дополнительных тангенциальных напряжений, возникающих на деформированном подводном склоне под воздействием влекущего напряжения ветра на свободной поверхности при определенных параметрах ветрового волнения [6 – 13].

Для определения транспорта наносов существует большое количество расчетных методик, которые не учитывают в достаточной мере влияние указанных выше условий их формирования. Выгодно отличаются в этом плане рекомендации по прогнозу динамики наносов в прибрежной зоне моря, разработанные на основе многолетних исследований А.Е. Михинова и других авторов [9, 10]. Эти рекомендации базируются на результатах аналитических и численных методов исследований, которые подтверждены многочисленными лабораторными и натурными данными, полученными авторами указанной работы, и опубликованных в отечественной и зарубежной литературе.

Рассматриваемая методика расчета транспорта донных и взвешенных наносов [10] распространяется на достаточно широкий диапазон изменения гидравлических условий в прибрежной зоне штормового моря. Однако, несколько не умаляя достоинств данной методики, следует указать на существенный ее недостаток – чрезмерная трудоемкость вычислений (около пятидесяти формул для определения удельного расхода наносов в отдель-

ной точке заданной вертикали). Учитывая, что для прогноза поля перемещения наносов даже на небольшом локальном участке берегового склона потребуется расчет для многих сотен отдельных точек, нетрудно представить огромный объем вычислений, что ограничивает возможность оперативного применения этой методики для обоснования различных задач морского гидротехнического строительства.

В связи с этим представляется целесообразным как с научной, так и с практической точек зрения, провести поиск дополнительных закономерностей, выявляющих взаимосвязи между характеристиками транспорта наносов в шельфовых морских зонах и характеристиками ветрового волнения на основе их параметризации.

Конечной целью настоящего исследования является разработка простого графо-аналитического метода расчета удельных расходов наносов в прибрежной зоне моря, приемлемого для оперативного использования в инженерной практике по теоретико-экономическому обоснованию морских гидротехнических работ, а также при решении ряда экологических задач.

## 1. АНАЛИЗ ПАРАМЕТРИЗАЦИИ ТРАНСПОРТА НАНОСОВ В ШЕЛЬФОВЫХ МОРСКИХ ЗОНАХ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ВЕТРОВОГО ВОЛНЕНИЯ

Для решения широкого круга вопросов динамики шельфовых зон морей имеет большое значение исследование транспорта наносов, обусловленного различными видами волновых воздействий и течений водных масс. Существуют, по крайней мере, два подхода к изучению массовых перемещений наносов в море под суммарным воздействием волн и волновых течений: исследование итоговых результатов перемещения наносов и переформирования рельефа за большие периоды времени, и изучение кратковременных подвижек материала и обусловленного ими изменения рельефа. Если в первом случае исследователи оперируют условными обобщенными представлениями, то во втором случае предпринимаются попытки увязать процесс массового перемещения наносов с реальными физическими величинами и вызывающими его факторами [10, 14–16].

Практика свидетельствует, что в периоды штормовых воздействий резкие кардинальные изменения в прибрежной зоне связаны с кратковременными перемещениями наносов и деформацией рельефа. Следовательно, для их прогнозирования

важно изучать не только общую картину переформирования берегового склона в результате продолжительных волновых воздействий, но и процессы, происходящие во время конкретных гидродинамических ситуаций [7–13].

Настоящие исследования посвящены развитию второго направления изучения транспортирующей способности волн. В качестве эталона для количественной оценки величин удельных расходов наносов при заданных параметрах ветрового волнения выполнены расчеты по рекомендации работы [10]. Результаты вычислений представлены в табл. 1 для условий:  $\lambda_0 = 12$ ;  $\alpha = 10^\circ$ ;  $u = v = 0$ ;  $d_{\text{ср}} = 0.1$  мм;  $S = 2.65$  т/м<sup>3</sup>, где  $\lambda_0$  – пологость волны;  $\alpha$  – угол между направлением распространения ветровой волны и нормалью к генеральному направлению линии берега;  $u, v$  – составляющие вектора течений на оси  $x$  и  $y$ ;  $d_{\text{ср}}$  – средний диаметр наносов,  $S$  – относительная плотность донного грунта.

Анализируя данные табл. 1, нетрудно обнаружить определенные корреляционные связи изменения величин  $q$  и  $q = f(h^2/H)$ . Упорядочив по этому признаку количественные оценки указанных величин (табл. 2, где удельные расходы взвешенных наносов рассчитаны по формуле (4) –  $q$  и по методике [10] для  $q^*$ ), построен график (рис. 1) зависимости  $h^2/H$ . Эту функциональную зависимость можно представить в виде

$$q = \phi \left( \frac{h^2}{H} \right)^3, \quad (1)$$

где  $\phi$  – неизвестный коэффициент, который предположительно должен определяться некоторыми соотношениями параметров волн. Учитывая эти соображения и исходя из соображений размерности, преобразуем зависимость (1) к виду:

$$q = 0.0149g \frac{\tau}{\lambda} \left( 1 - \frac{h}{H} \right)^{0.5} \left( \frac{h^2}{H} \right)^3. \quad (2)$$

Здесь постоянный коэффициент 0.0149 и переменный множитель  $\left( 1 - \frac{h}{H} \right)^{0.5}$  получены путем подбора при аппроксимации кривой на рис. 1. Таким образом, левая и правая части формулы (2) имеют размерность расхода (м<sup>3</sup>/с).

Исходя из некоторых соображений, оговоренных ниже, видится целесообразным произвести определенные преобразования зависимости (2). Для этого воспользуемся известными соотношениями:

$$\tau = 0.8\sqrt{\lambda}; \quad \lambda_0 = \frac{\lambda}{h}, \quad (3)$$

Табл 1. Результаты расчета по методике [10]

H	h	$\frac{h}{H}$	$\frac{h^2}{H}$	$q_{дон} \cdot 10^3$	$q_{взв} \cdot 10^3$	$\frac{q_{взв} - q_{дон}}{q_{взв}} \cdot 100\%$
м	м		м	м <sup>3</sup> /мс	м <sup>3</sup> /мс	
1	0.35	0.35	0.1225	0.000028	0.089	99.97
	0.50	0.50	0.250	0.00115	0.570	99.80
2	1.0	0.50	0.500	0.00426	2.480	99.80
3	1.0	0.333	0.333	0.00015	1.326	99.99
	1.5	0.500	0.750	0.0097	8.200	99.88
	2.0	0.666	1.333	0.1450	36.510	99.60
5	1.0	0.20	0.200	-	0.354	-
	2.0	0.40	0.800	-	10.69	-
	3.0	0.60	1.800	-	70.81	-
	4.0	0.80	3.200	-	240.7	-
8	1.0	0.125	0.125	-	0.032	-
	2.0	0.250	0.500	-	2.50	-
	3.0	0.375	1.125	0.0032	21.77	99.98
	4.0	0.500	2.000	0.0603	110.00	99.45

Табл 2. Результаты расчета по формуле (4) и методике [10]

h/H	$\frac{h}{H}$	$\frac{h^2}{H}$	$\frac{1}{\sqrt{h}}(1 - \frac{h}{H})^{0.5}$	$(\frac{h^2}{H})^3$	$q \cdot 10^3$	$q^* \cdot 10^3$
0.35/1	0.350	0.1225	1.361	0.0184	0.084	0.089
1/8	0.125	0.125	0.935	0.00195	0.062	0.032
1/5	0.200	0.200	0.894	0.008	0.241	0.354
0.5/1	0.500	0.250	1.00	0.0156	0.527	0.570
1/3	0.333	0.333	0.817	0.0370	1.020	1.326
2/8	0.250	0.500	0.612	0.125	2.580	2.500
1/2	0.500	0.500	0.707	0.125	2.830	2.480
1.5/3	0.500	0.750	0.577	0.422	8.230	8.200
2/5	0.400	0.800	0.548	0.512	9.32	10.69
3/8	0.375	1.125	0.456	1.424	21.95	21.77
2/3	0.666	1.333	0.409	2.369	32.70	38.51
3/5	0.600	1.800	0.365	5.832	71.88	70.81
4/8	0.500	2.000	0.353	8.000	95.52	110.00
4/5	0.800	3.200	0.224	32.768	247.40	240.70

где  $h, \lambda, \tau$  – высота, длина и период ветровых волн;  $h$  – локальная глубина;  $g$  – ускорение свободного падения;  $q$  – удельный расход наносов.

Произведя соответствующие подстановки, получим

$$q = 0.117 \frac{1}{(h\lambda_0)^{0.5}} \left(1 - \frac{h}{H}\right)^{0.5} \left(\frac{h^2}{H}\right)^3 \quad (4)$$

Принимая  $q_\lambda = q\sqrt{\lambda_0}$ , обозначим эту условную величину как некую обобщенную виртуальную характеристику удельных расходов наносов на единицу длины фронта волны.

Тогда зависимость (4) приведем к виду, удобному для практических расчетов и ее графической интерпретации:

$$q_\lambda = q\sqrt{\lambda_0} = 0.117 \frac{1}{\sqrt{h}} \left(1 - \frac{h}{H}\right)^{0.5} \left(\frac{h^2}{H}\right)^3 \quad (5)$$

Из этого следует, что правая часть равенства определяется только соотношением физических величин высоты волны и глубин на определенной вертикали. Здесь автоматически учитывается влияние относительной длины волны  $\lambda_0$  на величину удельных расходов. Основным параметром, опре-

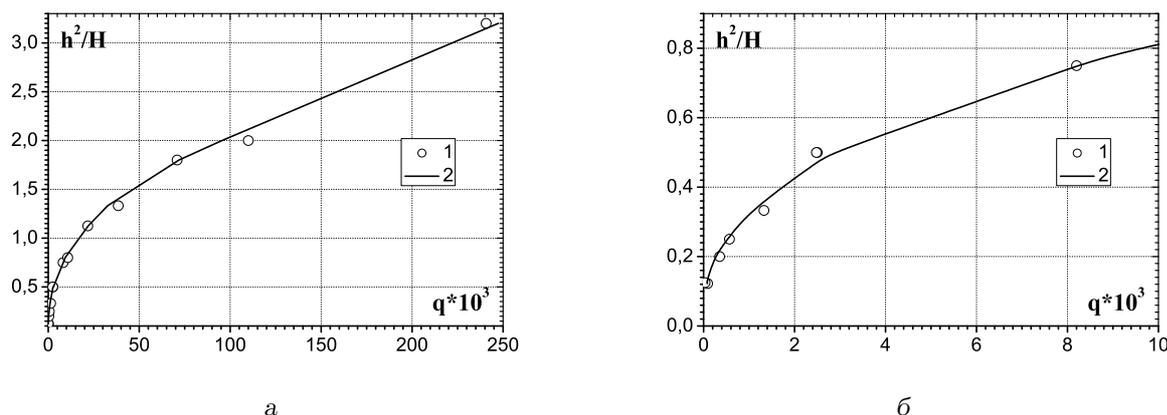


Рис. 1. Результаты расчета по методике работы [10] (точки) и по формуле (2) (кривые): а – диапазон исследуемых величин; б – фрагмент малых значений

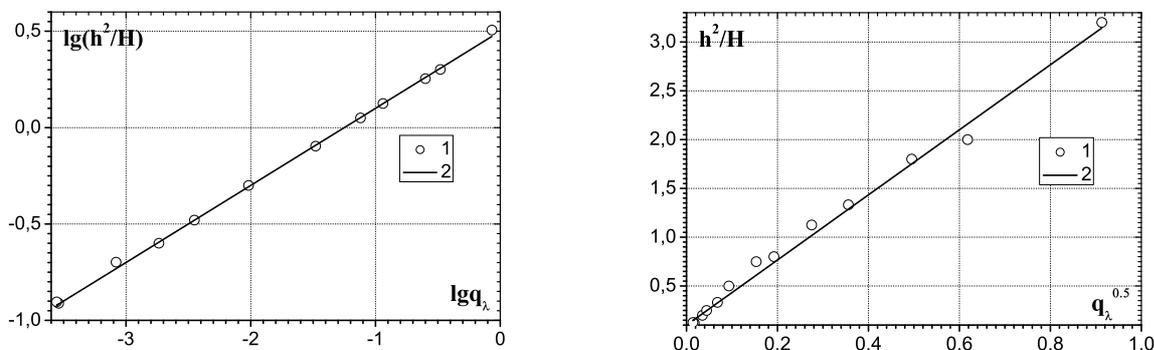


Рис. 2. Представление результатов расчета по методике [10] (точки) и по зависимости (6) (кривая) в билогарифмических координатах

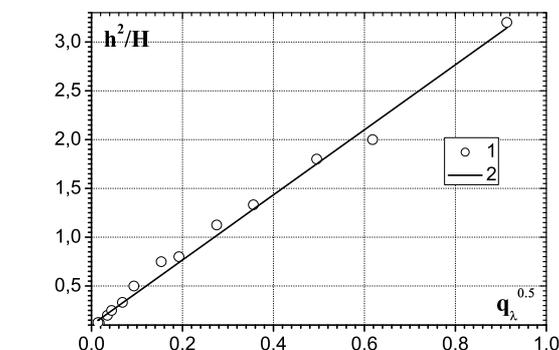


Рис. 3. Интерпретация результатов расчета по методике [10] (точки) и по зависимости (7) (кривая)

деляющим величину удельных расходов, является соотношение  $(h^2/H)$ , которое, как известно из литературы, трактуется как удельная энергия волны.

Графическая интерпретация закономерности (5) представлена в билогарифмических координатах на рис. 2, а ее аналитическая аппроксимация приводит к простой формуле:

$$\lg q_\lambda = 2.5 \lg \frac{h^2}{H} - 1.25. \quad (6)$$

Небезынтересно будет рассмотреть еще один вид взаимосвязи удельных характеристик энергии волны и расхода наносов, представленных на рис. 3. Эта зависимость может быть выражена простой формулой (в первом приближении):

$$q_\lambda = \left( 0.3 \frac{h^2}{H} - 0.03 \right)^2. \quad (7)$$

Для сравнительной оценки результаты расчетов по формулам (5) – (7) и по рекомендациям работы [10] сведены в табл. 3.

Как следует из рассмотрения данных табл. 3. и рис. 1 – 3, получено весьма хорошее соответствие количественных оценок удельных расходов наносов для всего диапазона исследуемых гидравлических условий в прибрежной зоне моря.

### ВЫВОДЫ

1. Получены оригинальные зависимости удельных расходов наносов от удельной энергии волн.

Табл 3. Сравнительная оценка определения удельных расходов взвешенных наносов по методике [10] и предлагаемым формулам

$h^2/H$	$q_{\lambda} \cdot 10^3$ [10]	$q_{\lambda} \cdot 10^3$ (5)	$q_{\lambda} \cdot 10^3$ (6)	$q_{\lambda} \cdot 10^3$ (7)
0.1225	0.308	0.290	0.294	0.0455
0.125	0.215	0.213	0.310	0.056
0.200	1.226	0.836	1.020	0.900
0.250	1.974	1.826	1.770	2.025
0.333	4.593	3.533	3.630	4.900
0.500	8.625	9.500	10.00	14.400
0.750	28.40	28.500	27.60	38.00
0.800	37.00	32.29	39.00	44.10
1.125	75.41	76.05	77.50	94.25
1.333	126.47	113.26	116.00	115.60
1.800	245.28	249.00	246.00	260.00
2.000	381.00	330.90	320.00	324.90
3.200	833.80	857.00	1030.00	864.90

2. Рассмотрен случай реализации гидравлических условий в прибрежной зоне моря, ограниченных однозначным заданием крупности наносов и угла подхода волн на горизонтальном дне.

3. Предложены расчетные формулы для прогноза динамики взвешенных наносов в шельфовой зоне моря, значительно сокращающие трудоемкость инженерных расчетов.

4. Предложенная методика прогнозов наносов в шельфовой зоне моря представляется перспективной для распространения ее на различные произвольные условия подхода волн, уклона берегового склона и крупности наносов.

5. Настоящие исследования стали возможными благодаря использованию добротной разработанной методики прогноза наносов в прибрежной зоне моря [10], которая базируется на результатах многолетних аналитических и численных методов исследований, подтвержденных многочисленными лабораторными и натурными данными. Хорошие совпадения количественных оценок удельных расходов наносов по новым зависимостям и по рекомендациям [10] свидетельствуют об обоснованности предлагаемых решений.

1. *Берега морей и внутренних водоемов.* Актуальные проблемы геологии, геоморфологии и динамики.– Новосибирск: СО РАН, 1999.– 182 с.
2. *Природопользование на Черноморском побережье Западного Крыма: современное состояние и перспективы развития* / Под ред. В. А. Иванова.– Севастополь: Морской гидрофизический институт НАН Украины, 2006.– 324 с.
3. *Леонтьев И. О.* Прибрежная динамика: волны, течения, потоки наносов.– М.: ГЕОС, 2001.– 193 с.

4. *Михинов А. Е.* Транспорт наносов и динамика донного рельефа в береговой зоне открытых водоемов.– Депон. рукопись № 8123- В88.– М.: ВИНИТИ, 1988.– 112 с.
5. *Михинов А. Е.* Транспортная и эрозионно-аккумулятивная способность волновых потоков в береговой зоне открытых водоемов // Управление водными ресурсами вод суши: теория и практика.– М.: Наука.– 1989.– С. 111–152.
6. *Trincardi H. C., Mimisini D., Verdicchio G., Ascoli A., Piva A.* Dating mass-transport deposits along continental margins affected by bottom currents // Geophysical Research Abstracts.– 2007.– 9, № 09057.– P. 177–186.
7. *Rubin D. M., Chezar H., Harney J. N., Topping D. J., Melis T. S., Sherwood C. R.* Underwater microscope for measuring spatial and temporal changes in bed - sediment grain size // Sedimentary Geology.– 2006.– № 5.– P. 27–32.
8. *Warner J., Sherwood C. R., Signell R. P., Harris C. K., Arango H. G.* Development of three-dimensional, regional, coupled wave, current and sediment-transport model // Computers and Geosciences.– 2006.– № 3.– P. 65–67.
9. *Баклановская В. Ф., Михинов А. Е., Чечель М. И.* Численное моделирование гидродинамики морской прибрежной зоны с учетом литодинамических процессов // Моделирование гидродинамических процессов и полей в замкнутых водоемах и морях.– М.: Наука.– 1989.– С. 117–132.
10. *Иванов В. И., Михинов А. Е.* Прогноз динамики наносов в прибрежной зоне моря (практические рекомендации и примеры расчетов).– Севастополь: Морской гидрофизический институт НАН Украины, 1991.– 51 с.
11. *Дебольский В. К., Анциферов С. М., Акавис Т. М.* Задачи прогноза распределения наносов, взвешенные в русловых и приливных потоках // Водные проблемы на рубеже веков.– М.: Наука.– 1999.– С. 107–124.
12. *Косьян Р. Д., Кузнецов С. Ю., Кунц Х., Подымов И. С., Пыхов Н. В.* Натурные исследования механизмов взвешивания наносов нерегулярными волнами // Материалы XXI международной береговой конференции. Прибрежная зона моря: Морфодинамика и геоэкология.– Калининград: Изд-во КГУ.– 2004.– С. 141–143.
13. *Хейнс Д. М., Тостесон Э. Д.* Натурные исследования взвешенных наносов и мелкомасштабных форм рельефа дна в прибрежной зоне // Материалы XXI международной береговой конференции. Прибрежная зона моря: Морфодинамика и геоэкология.– Калининград: Изд-во КГУ.– 2004.– С. 144–146.
14. *Марченко А. Г.* О взаимодействии волнового потока с размываемым дном // Гидромеханика.– 1976.– 33.– С. 12–15.
15. *Марченко А. Г., Терещенко Л. Н.* Анализ динамики движения наносов под воздействием ветрового волнения // Вісник Донецького Університету.– 2007.– 2.– С. 52–63.
16. *Марченко А. Г.* О некоторых подходах к прогнозным оценкам динамики наносов в мелководных акваториях морей и океанов // Труды XXII Междунар. береговой конф. Проблемы управления и устойчивого развития прибрежной зоны моря.– Геленджик.– 2007.– С. С. 42–44.