

## Исследование динамики потока наносов на береговой линии Новосибирского водохранилища

*В.В. Журавлева, Т.В. Дьякова*

Алтайский государственный университет (Барнаул, Россия)

## Research of Sediments Flow Dynamics at Novosibirsk Reservoir Shoreline

*V.V. Zhuravleva, T.V. Dyakova*

Altai State University (Barnaul, Russia)

Описаны модели формирования волн и транспорта наносов на береговой линии Новосибирского водохранилища. По этим моделям проведены расчеты параметров волн для четырех участков сегмента берега водохранилища (с. Быстровка Искитимского района Новосибирской области). При определении среднегодовой продолжительности ветра для активных румбов использованы данные гидрометеостанции Ордынское. Для каждого участка рассчитаны годовые емкости потока песчаных наносов при различной крупности материала и значения удельного дефицита (профицита) вдольберегового потока наносов с 1990 г. по 2010 г. Расчеты выполнялись с использованием приложения «Береговой Инженерный Калькулятор» (разработано в Институте водно-экологических проблем СО РАН). Проведен анализ полученных результатов и сравнение с аналогичными результатами за период 1959–1986 гг. Среднегодовые емкости потока наносов, полученные за указанное время, в несколько раз превосходят значения по расчетному периоду и имеют противоположное направление. Анализ значений удельного дефицита вдольберегового потока наносов показывает, что размыв берега сменился незначительной аккумуляцией наносов. Сделан общий вывод о замедлении морфодинамических процессов на береговой линии Новосибирского водохранилища в районе с. Быстровка.

**Ключевые слова:** водохранилище, транспорт наносов, ветровой режим, волна, разгон волны.

DOI 10.14258/izvasu(2014)1.2-16

Под воздействием движения воздушных масс на поверхности водоемов генерируются ветровые волны. Подходя к берегу, волны обрушаются, при этом выделяется энергия, значительная часть которой расходуется на размыв берега и дна водоема. В результате происходит трансформация береговой линии и рельефа дна.

In this paper, models of wave formation and sediments transportation at the shoreline of Novosibirsk reservoir are presented. The models are utilized to calculate wave parameters for the four sections of the reservoir shoreline segment at p. Bystrovka, Iskitim district of Novosibirsk region. The average annual wind duration data for active rhumbs are obtained from Ordynskoe Hydrometeorostation. Annual capacities of sand sediments flows are calculated for each site with different grain sizes and different values of longshore sediment flow specific deficit (proficit) for the period from 1990 to 2010.

The calculations are performed in the application «Coastal Engineering Calculator» (developed in the Institute of Water and Environmental Problems SB RAS). Results of the calculation are analyzed and compared with similar data for the period from 1959 to 1986. Average annual capacities of sediments flows for the period from 1959 to 1986 are reported to be several times higher and have the opposite direction than the calculated capacities for the period from 1990 to 2010. Analysis of the longshore sediment flow specific deficit dynamics demonstrates changes of the longshore coast from erosion to slight sediment accumulation. In the conclusion, slowing of morphodynamic processes at the shoreline of Novosibirsk reservoir near Bystrovka is outlined.

**Key words:** reservoir, sediment transportation, wind patterns, wave, wave fetch.

В настоящее время в России создано более 2 тыс. водохранилищ, ресурсы которых используются в интересах гидроэнергетики, водоснабжения, водного транспорта, рыбного хозяйства и др. Более 30% общей протяженности берегов крупных водохранилищ интенсивно разрушается, что наносит значимый эко-

логический и социально-экономический ущерб [1]. В связи с этим актуальными являются задачи моделирования и исследования процессов размыва и аккумуляции наносов на береговой линии водохранилищ.

Соответствующие модели реализованы в программном продукте «Береговой Инженерный Калькулятор» (ИВЭП СО РАН), предназначенном для решения типовых задач, возникающих при исследовании и прогнозировании процессов переработки берегов крупных водоемов (морей, водохранилищ, озер), а также при проектировании берегозащитных сооружений. Приведенные ниже результаты получены с помощью данного приложения.

Объектом исследования является сегмент правого берега Новосибирского водохранилища в районе с. Быстровка Искитимского района Новосибирской области. Сегмент разбит на участки разной длины и экспозиции (табл. 1, рис. 1).

Рассматриваемый сегмент берега открыт для действия ветров следующих румбов: З, ЗСЗ, СЗ, ССЗ, С, ССВ, СВ, ВСВ. Румб ВСВ ввиду малой длины разгона (около 1 км) и большого угла подхода волн, близко к 90°, не рассматривается. Для остальных румбов, кроме С, разгон существенно ограничивается островами и мелководьями. Для определения продолжительности волновых нагрузок использованы данные ГМС Ордынское (средняя часть водохранилища).

В работе [2] получены данные для средней повторяемости ветра по градациям скорости и активным румбам за 1990–2010 гг. По ним рассчитывалась среднегодовая продолжительность волнения в часах (с учетом длительности безледоставного периода). Результаты представлены в таблице 2.

Ветровой режим формирует нерегулярные ветровые волны, параметры которых зависят, кроме того, от разгона (расстояния от подветренного берега

Таблица 1

Длины и экспозиции береговой линии на участках

Номер участка	Длина участка, м	Экспозиция береговой линии, α°
1	1306	324
2	967	341
3	1046	339
4	621	345

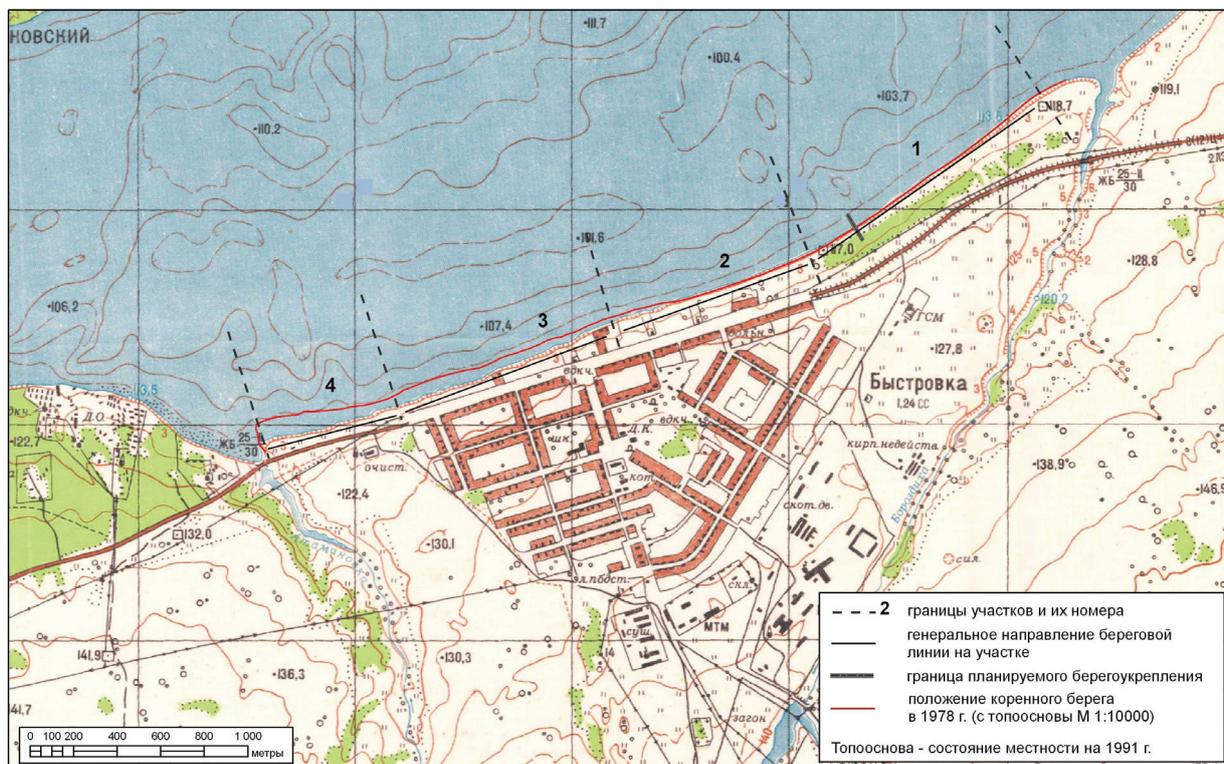
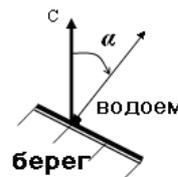


Рис. 1. Разбивка на участки правого берега Новосибирского водохранилища в районе с. Быстровка

Таблица 2  
Среднегодовая продолжительность ветра (ч.) за безледоставный период по градациям скорости для активных румбов (1990–2010 гг.)

Интервалы скорости, м/с	Скорость ветра средняя, м/с	Активные румбы									
		З	ЗСЗ	СЗ	ССЗ	С	ССВ	СВ			
0-1,5	0,7	69,56	59,36	60,40	49,97	97,85	51,82	54,61			
1,6-3,5	2,5	146,08	82,78	75,47	78,60	151,18	109,33	112,46			
3,6-5,5	4,5	54,26	24,46	20,52	15,19	33,27	28,40	35,94			
5,6-7,5	6,5	8,35	2,32	1,62	1,16	3,25	0,93	2,09			
7,6-9,5	8,5	0,70	0,12	0,23	0,00	0,23	0,12	0,23			

Таблица 3  
Характеристики участков разгона по активным румбам ветра

Румб	Разгон X, м	Участки разгона (li — длина участка, hi — глубина в конце участка)																				
		i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	
З	11594	li,м	1967	223	623	220	2752	1347	372	233	2093	672	394	228	470							
		hi,м	7,8	6,3	8,5	6,10	16,0	6,1	13,5	5,4	9,9	7,3	10,4	9,5	11,0							
ЗСЗ	10176	li,м	231	362	1206	165	1229	1340	990	390	517	889	1017	517	1323							
		hi,м	3,5	1,6	3,5	2,2	11,0	8,5	16,0	9,2	13,5	3,5	11,0	5,3	11,0							
СЗ	8949	li,м	533	231	478	252	156	553	201	481	222	381	479	659	252	787	993	218	655	284	1134	
		hi,м	4,8	2,1	2,3	8,5	8,5	2,30	11,0	9,7	13,5	11,0	11,7	8,5	13,5	8,5	8,5	16,0	1,5	11,0	3,6	11,0
ССЗ	8860	li,м	2115	2898	497	266	908	333	487	660	696											
		hi,м	13,5	11,0	13,3	10,3	16,0	4,7	11,0	6,0	11,0											
С	14638	li,м	980	569	623	543	729	1487	1157	1525	1561	2263	485	773	555	301	1087					
		hi,м	8,5	3,5	11,0	8,5	11,0	3,8	12,9	8,5	13,5	11,0	16,0	6,7	8,5	3,2	11,0					
ССВ	16622	li,м	1470	579	613	2116	7297	3233	1314													
		hi,м	4,0	6,0	4,0	4,0	17,0	4,0	11,0													
СВ	12418	li,м	597	2409	3186	826	1758	1052	2590													
		hi,м	4,0	18,0	18,0	11,0	11,0	8,0	11,0													

до расчетной точки) и глубины водоема. Средняя высота ( $\bar{H}$ ) и период ( $\bar{T}$ ) волн в случае установившегося режима волнообразования (время действия ветра не влияет на параметры волн) могут быть вычислены по эмпирическим зависимостям [3]

$$\frac{g\bar{H}}{V^2} = 0,16 \left\{ 1 - \left[ 1 + 0,006 \left( \frac{gX}{V^2} \right)^{0,5} \right]^{-2} \right\} \times \left( 0,625 \frac{\left( \frac{gh}{V^2} \right)^{0,8}}{\left\{ 1 - \left[ 1 + 0,006 \left( \frac{gX}{V^2} \right)^{0,5} \right]^{-2} \right\}} \right), \quad (1)$$

$$\frac{g\bar{T}}{V} = 3,1 \times 2\pi \left( \frac{g\bar{H}}{V^2} \right)^{0,625}, \quad (2)$$

где  $V$  — скорость ветра, м/с;  $X$  — длина разгона, м;  $h$  — глубина водоема на разгоне, м;  $g$  — ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>.

В случае если глубина на разгоне существенно изменяется, весь путь волн до расчетной точки разбивается на ряд последовательных участков с примерно постоянным уклоном дна (рис. 2). Параметры волн определяются в конце каждого участка.

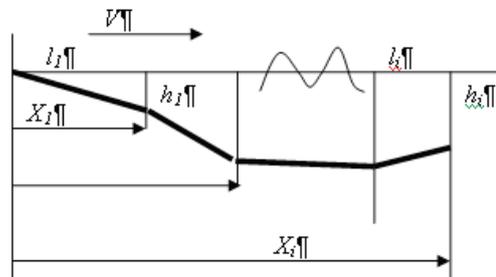


Рис. 2. Схема разбивки разгона на участки при изменяющейся глубине

Характеристики участков разгона по каждому румбу представлены в таблице 3. По этим данным выполнен расчет параметров волн вне береговой зоны по каждому из активных румбов для скоростей ветра в интервале 0,7–8,5 м/с. Результаты расчетов представлены в таблице 4.

Таблица 4

Параметры волнения вне береговой зоны

Румб	Расчетная скорость ветра	Параметры волн вне береговой зоны (на глубине 11 м)		Продолжительность волнения
		высота «значительной» волны	период пика спектра волн	
	W, м/с	H <sub>с</sub> , м	T <sub>р</sub> , с	P, час/год
СВ	0,70	0,01	0,44	54,61
	2,50	0,05	0,96	112,46
	4,50	0,09	1,28	35,94
	6,50	0,14	1,50	2,09
	8,50	0,19	1,69	0,23
ССВ	0,70	0,01	0,57	51,82
	2,50	0,12	1,74	109,33
	4,50	0,3	2,65	28,40
	6,50	0,49	3,27	0,93
	8,50	0,67	3,74	0,12
С	0,70	0,01	0,48	97,85
	2,50	0,06	1,08	151,18
	4,50	0,12	1,46	33,27
	6,50	0,18	1,73	3,25
	8,50	0,24	1,96	0,23
ССЗ	0,70	0,01	0,51	49,97
	2,50	0,07	1,28	78,60
	4,50	0,16	1,77	15,19
	6,50	0,24	2,13	1,16

СЗ	0,70	0,01	0,44	60,40
	2,50	0,05	0,93	75,47
	4,50	0,09	1,24	20,52
	6,50	0,13	1,46	1,62
	8,50	0,18	1,64	0,23
ЗСЗ	0,70	0,01	0,56	59,36
	2,50	0,03	0,76	82,78
	4,50	0,06	0,98	24,46
	6,50	0,09	1,14	2,32
	8,50	0,12	1,28	0,12
З	0,70	0,01	0,51	69,56
	2,50	0,07	1,25	146,08
	4,50	0,15	1,74	54,26
	6,50	0,24	2,09	8,35
	8,50	0,32	2,37	0,70

В береговой зоне волны испытывают процессы трансформации и рефракции. Эти процессы и их модели подробно описаны в [1]. Подходя к берегу, волны обрушаются, создавая вдольбереговой дрейф воды в прибрежной зоне и, следовательно, транспорт наносов.

Транспорт наносов, имеющий направление слева-направо при взгляде с берега в акваторию, считается положительным, в обратном направлении — отрицательным.

Полный расход наносов вдольберегового потока ( $Q$ , м<sup>3</sup>/с) зависит от высоты, периода волны и угла подхода волн на линии их обрушения, а также от крупности транспортируемого материала, который характеризуется его медианным диаметром  $d_{50}$ . По крупности наносы условно разделяют на:  $0,062 < d_{50} \leq 2$  мм — песок;  $2 < d_{50} \leq 64$  мм — гравий;  $64 < d_{50} \leq 256$  мм — галька.

При расчете расхода наносов для песчаника ( $0,01 \leq d_{50} \leq 1$  мм) широко используется формула CERC [4]

$$Q = \frac{K(d)}{16(\rho_s / \rho - 1)(1 - p)(1,416)^{5/2}} \cdot (H_s^2 C_g)_b \cdot \sin 2\theta_b, \quad (3)$$

где  $K(d) = 1,434d_{50}^2 - 3,2445d_{50} + 2,0184$  — безразмерный коэффициент емкости потока;  $\rho_s$  — плотность наносов, кг/м<sup>3</sup> (для кварцевых песков — 2650 кг/м<sup>3</sup>);  $\rho$  — плотность воды, кг/м<sup>3</sup> (для пресной воды — 1000 кг/м<sup>3</sup>);  $p$  — коэффициент пористости (для песчаного грунта — 0,4);  $H$  — высота волны, м;  $C_g$  — групповая скорость волны, м/с;  $\theta$  — угол подхода волны. Индекс  $b$  означает, что соответствующие параметры берутся на линии обрушения волн.

Для расчетов в формуле (3) используются высота «значительной» волны ( $H_s$ ) и период пика волнового

спектра ( $T_p$ ), которые связаны со средними параметрами волн следующими соотношениями [4]:

$$H_s = 1,6H, \quad T_p = 1,2T. \quad (4)$$

Представим все действующие на участок берега в течение периода открытой воды волновые нагрузки, как набор «штормов». Тогда результирующий годовой поток наносов [1]

$$Q_{\Sigma} = \sum Q_{yi}, \quad Q_{yi} = 3600 \cdot P_i \cdot Q_i, \quad (5)$$

где  $Q_i$  — секундный расход наносов  $i$ -го шторма, м<sup>3</sup>/с;  $P_i$  — продолжительность  $i$ -го шторма, час/год;  $Q_{yi}$  — годовой расход наносов  $i$ -го шторма, м<sup>3</sup>/год.

По данным таблиц 2 и 4 для каждого участка были рассчитаны годовые емкости потока наносов по направлениям (слева-направо и справа-налево) и их результирующее значение в интервале крупности материала 0,1–1 мм. Итоги представлены в таблице 5.

Проанализируем полученные результаты. По мере движения от 1-го участка к 4-му происходит уменьшение потока наносов (по модулю). Причем значения всех потоков отрицательны (направление справа-налево), что приводит к накоплению излишнего материала в береговой зоне (аккумуляции). Через участок 3 поток проходит транзитом.

Интенсивность процессов размыва и аккумуляции можно оценить по величине удельного дефицита (профицита) вдольберегового потока наносов [1]

$$dq = (Q_{\text{вх}} - Q_{\text{вых}})/L, \quad (6)$$

где  $dq$  — удельный дефицит (–) или профицит (+) потока наносов, м<sup>3</sup>/(год·м);  $L$  — длина участка, м;

Таблица 5

Емкость годового потока наносов (м<sup>3</sup>/год) по участкам при различной крупности материала (1990–2010 гг.)

$d_{50}$ , мм	Участок 4			Участок 3			Участок 2			Участок 1		
	$Q_+$	$Q_-$	$Q_{\Sigma}$									
<b>0,10</b>	318	645	<b>-327</b>	340	739	<b>-399</b>	331	731	<b>-400</b>	246	834	<b>-588</b>
<b>0,25</b>	242	489	<b>-247</b>	259	561	<b>-302</b>	252	556	<b>-304</b>	187	634	<b>-447</b>
<b>0,50</b>	141	285	<b>-144</b>	150	325	<b>-175</b>	146	322	<b>-176</b>	109	367	<b>-258</b>
<b>0,75</b>	72	147	<b>-75</b>	78	169	<b>-91</b>	74	168	<b>-94</b>	55	192	<b>-137</b>
<b>0,90</b>	49	97	<b>-48</b>	51	113	<b>-62</b>	50	113	<b>-63</b>	38	125	<b>-87</b>
<b>1,0</b>	38	79	<b>-41</b>	40	89	<b>-49</b>	38	87	<b>-49</b>	29	67	<b>-38</b>

$d_{50}$  — медианный диаметр наносов, мм;  $Q_+$  — поток наносов слева-направо;  
 $Q_-$  — поток наносов справа-налево;  $Q_{\Sigma} = (Q_+ - Q_-)$  — результирующий поток, м<sup>3</sup>/год

Таблица 6

Удельный дефицит (профицит) вдольберегового потока наносов (м<sup>3</sup>/год·м) по участкам при различной крупности материала (1990–2010 гг.)

$d_{50}$ , мм	Участок 2				Участок 3				Участок 4			
	$L$	$Q_{вх}$	$Q_{вых}$	$dq$	$L$	$Q_{вх}$	$Q_{вых}$	$dq$	$L$	$Q_{вх}$	$Q_{вых}$	$dq$
<b>0,10</b>	967	588	400	<b>0,194</b>	1046	400	399	<b>0,001</b>	621	399	327	<b>0,116</b>
<b>0,25</b>	967	447	304	<b>0,148</b>	1046	304	302	<b>0,002</b>	621	302	247	<b>0,089</b>
<b>0,50</b>	967	258	176	<b>0,085</b>	1046	176	175	<b>0,001</b>	621	175	144	<b>0,050</b>
<b>0,75</b>	967	137	94	<b>0,044</b>	1046	94	91	<b>0,003</b>	621	91	75	<b>0,026</b>
<b>0,90</b>	967	87	63	<b>0,025</b>	1046	63	62	<b>0,001</b>	621	62	48	<b>0,023</b>
<b>1,00</b>	967	38	49	<b>-0,011</b>	1046	49	49	<b>0,000</b>	621	49	41	<b>0,013</b>

Таблица 7

Удельный дефицит (профицит) вдольберегового потока наносов (м<sup>3</sup>/год·м) по участкам при различной крупности материала (1959–1986 гг.)

$d_{50}$ , мм	Участок 1		Участок 2		Участок 3		Участок 4	
	$L$	$dq$	$L$	$dq$	$L$	$dq$	$L$	$dq$
<b>0,10</b>	1306	<b>-1,374</b>	967	<b>0,266</b>	1046	<b>-0,750</b>	621	<b>-1,915</b>
<b>0,25</b>	1306	<b>-1,047</b>	967	<b>0,204</b>	1046	<b>-0,570</b>	621	<b>-1,452</b>
<b>0,50</b>	1306	<b>-0,609</b>	967	<b>0,119</b>	1046	<b>-0,332</b>	621	<b>-0,847</b>
<b>0,75</b>	1306	<b>-0,316</b>	967	<b>0,060</b>	1046	<b>-0,173</b>	621	<b>-0,438</b>
<b>0,90</b>	1306	<b>-0,211</b>	967	<b>0,039</b>	1046	<b>-0,110</b>	621	<b>-0,293</b>
<b>1,00</b>	1306	<b>-0,166</b>	967	<b>0,031</b>	1046	<b>-0,089</b>	621	<b>-0,232</b>

$Q_{вх}$  и  $Q_{вых}$  — емкости результирующего потока наносов на входе и выходе с участка, м<sup>3</sup>/год.

Значения удельного дефицита (профицита) вдольберегового потока наносов по участкам приведены в таблице 6 (оценить расчетное значение для первого участка нет возможности из-за отсутствия данных на участке справа). На участках 2 и 4 значения удельного дефицита вдольберегового потока положи-

тельные, что соответствует аккумуляции материала. Размер величин позволяет сделать вывод, что отложение наносов невелико. Участок 3 на всем своем протяжении практически стабилен. Полученные результаты достаточно хорошо согласуются с наблюдениями.

Сравним результаты расчетов с аналогичными для периода 1959–1986 гг. (табл. 7). На всех участках, кроме второго, происходил значительный размыв

(отрицательные величины  $dq$ ), а на участке 2 — умеренная аккумуляция материала. Величины среднегодовых емкостей потока наносов, рассчитанные за этот период, в 4–10 раз превосходят значения из таблицы 5 и, более того, имеют противоположное направление (что также согласуется с реальными наблюдениями).

Итак, сравнительный анализ полученных в работе результатов с аналогичными данными за 1959–1986 гг. показал существенное замедление морфодинамиче-

ских процессов на береговой линии Новосибирского водохранилища в районе с. Быстровка. Такой результат, в первую очередь, связан с тем, что в последние два десятилетия в этом районе ветровой режим изменился (скорости ветров значительно снизились). Таким образом, благодаря росту лесного массива, повлиявшему на ветровой режим, произошло замедление размыва берега на исследуемом сегменте водохранилища.

### Библиографический список

1. Хабидов А.Ш., Леонтьев И.О., Марусин К.В., Шлычков В.Л., Савкин В.М., Кусковский В.С. Управление состоянием берегов водохранилищ. — Новосибирск, 2009.

2. Журавлева В.В., Дьякова Т.В. Исследование повторяемости ветров на Новосибирском водохранилище // Известия Алт. гос. ун-та. — 2012. — №1/2(73).

3. Крылов Ю.М., Стрекалов С.С., Цыплухин В.Ф. Ветровые волны и их воздействие на сооружения. — Л., 1976.

4. Леонтьев И.О. Прибрежная динамика: волны, течения, потоки наносов. М., 2001.