

## ОСОБЕННОСТИ СТРОЕНИЯ БЕРЕГОВ КРУПНЫХ ВОДОХРАНИЛИЩ

**А.Ш. Хабидов, К.В. Марусин\***

*На крупных водохранилищах наиболее представительным типом берегов являются берега, формируемые волнами и вызванными ими течениями. Для берегов этого типа основные черты рельефа и строения осадочных толщ береговой зоны подобны чертам рельефа и строения осадочных толщ береговой зоны морей. Однако берега морей и внутренних водоемов имеют заметные морфометрические различия. Показано, что причина этих различий - масштабные эффекты, возникающие при развитии ветровых волн на акваториях с разновеликими линейными размерами.*

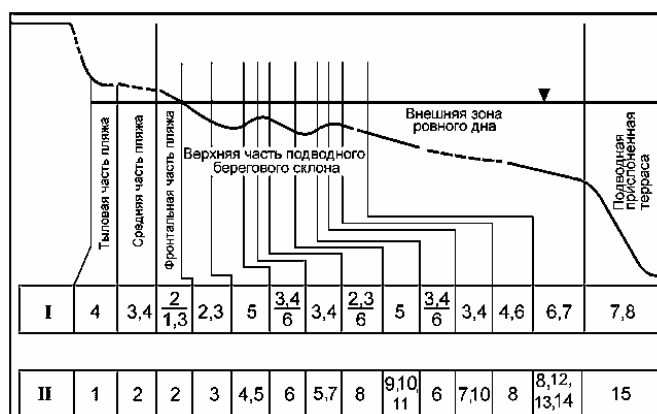
Создание крупных водохранилищ радикально изменяет условия развития рельефа затапливаемой части речных долин и прилегающих территорий. Эти изменения, в частности, повсеместно влекут за собой преобразование собственно флювиальных обстановок рельефообразования и осадконакопления в обстановке преимущественно флювиального и преимущественно волнового морфолитогенеза, разделяемые областями переходного типа. Наиболее представительны по площади акватории и периметру береговой линии обстановки преимущественно волнового морфолитогенеза, наиболее характерной чертой которых считается высокая интенсивность берегоформирующих процессов [1].

---

\* © А.Ш. Хабидов, К.В. Марусин, Институт водных и экологических проблем СО РАН, 2006, khabidov@iwerp.asu..ru

Проведенные исследования [2] позволили выявить в обстановках преимущественно волнового морфогенеза крупных водохранилищ практически весь комплекс форм рельефа береговой зоны. На абразионных берегах искусственных водоемов были обнаружены активные, отмирающие и отмершие клифы, разнообразные бенчи и формы микрорельефа. Заметно более представительным на водохранилищах оказался спектр береговых аккумулятивных форм волнового генезиса: прислоненные пляжи, пляжи полного профиля и пляжи, образованные сериями береговых валов, примкнувшие аккумулятивные формы (террасы донного и вдольберегового питания, террасы, заполняющие вогнутость, симметричные выступы двухстороннего питания и асимметричные выступы одностороннего питания), свободные аккумулятивные формы (косы одностороннего питания и стрелки двухстороннего питания), замыкающие аккумулятивные формы (пересыпи в устье бухт, томболо и межостровные переделы), окаймляющие аккумулятивные формы (скобковидные косы двухстороннего питания, петлевидные косы одностороннего питания, симметричные двойные окаймляющие косы) и отчлененные аккумулятивные формы (островные и береговые псевдобары, аккумулятивные острова, возникшие при разрыве тела косы). Донные аккумулятивные формы в береговой зоне искусственных водоемов представлены подводными прислоненными террасами, продольными и поперечными подводными валами, мегарифелями, дюнами и антидюнами, а микрорельеф – невихревыми рифелями, двух- и трехмерными вихревыми рифелями и рифелями типа «кирпичная кладка».

Возникновение всех названных форм рельефа однозначно свидетельствует о подобии рельефообразующих процессов волновой природы в береговой зоне крупных водохранилищ и морей, для которых их аналогии описаны достаточно давно [3-5 и др.]. Дополнительные подтверждения этому дало изучение прибрежных фаций. Поскольку накапливающиеся в определенной геоморфологической единице – в нашем случае в береговой зоне водоема – осадки представляют собой продукт источника сноса и физических условий их образования [6], то толщи осадков береговой зоны морей и водохранилищ будут иметь общие черты строения, что легко установить, сопоставляя данные, приводимые на рис. 1, и материалы изучения осадочных толщ прибрежно-морского генезиса [7-9 и др.].



**Рис. 1. Обобщенная схема вертикальной дифференциации структур и характера слоистости осадков береговой зоны крупного водохранилища**

**I - Гранулометрический состав осадков:** 1. Гравий и галька. 2. Крупнозернистый песок. 3. Среднезернистый песок. 4. Мелкозернистый песок. 5. Разнозернистый песок. 6. Крупный алеврит. 7. Мелкий алеврит. 8. Пелит. В числителе - преобладающие фракции, в знаменателе - примеси.

**II - Приоритетные типы слоистости:** 1. Тонкослоистый песок. 2. Косослоистые пески пляжа. 3. Параллельное наложение песков. 4. Косослоистые пески ложбины приурезового подводного вала. 5. Мульдообразная слоистость. 6. Плоскостная косая слоистость. 7. Горизонтальная или субгоризонтальная плоская слоистость. 8. Пологонаклонная косая слоистость. 9. Косая слоистость мегарифелей. 10. Мелкая рифельная слоистость. 11. Косая клиновидная слоистость. 12. Субгоризонтальная параллельная слоистость. 13. Слоистость грубого переслаивания. 14. Слоистость отдельных фазеров и линз. 15. Диагональная слоистость с крутым падением слоев

Как следствие общности процессов рельефообразования и осадконакопления формирующийся на берегах нормального развития крупных водохранилищ профиль береговой зоны в чисто геоморфологическом смысле не отличается от профиля берегов нормального развития морей, основные черты которого хорошо известны еще по работам В.П. Зенковича [3], О.К. Леонтьева [4], В.В. Лонгинова [10] и других исследователей. Однако, сопоставив морфометрические особенности профилей береговой зоны искусственных водоемов и бесприливных морей на участках с избытком и дефицитом песчаных наносов, мы увидим их существенные различия:

(i) **Пляжи.** Средняя величина угла наклона естественных пляжей крупных водохранилищ превышает величину угла наклона морских пляжей, сложенных преимущественно мелкозернистым песком, на 0°34', а пляжей, сложенных гравийно-галечным материалом, – на 4°00' (табл. 1).

(ii) *Прибрежная зона.* На берегах морей с дефицитом наносов в прибрежной зоне формируются профили подводного берегового склона с характерными уклонами порядка 0,020-0,025 в его верхней части и превышающими 0,01 - в нижней, а на участках с профицитом наносов соответствующие величины уклонов дна не превышают 0,015 и 0,01 [10]. На крупных водохранилищах участки прибрежной зоны с углами наклона дна 3-5° (уклоны до 0,087) считаются [11] довольно типичными для обстановок с избыточным питанием наносами, в которых происходит формирование разнообразных береговых аккумулятивных форм. Однако, по нашим данным [1], такие углы – предельный случай для аккумулятивных берегов искусственных водоемов, скорее речь может идти об углах наклона дна порядка 2-2,5° (уклоны 0,035-0,040).

Таблица 1

Средние уклоны естественных пляжей морей и крупных водохранилищ

Преобладающая размерность осадков	Водоохранилища		Моря
	Средний уклон пляжа	Интервал измеренных значений	Средний уклон пляжа*
Мелкозернистый песок	0,05	0,03-0,07	0,04
Среднезернистый песок	0,09	0,04-0,12	0,07
Крупнозернистый песок	0,17	0,14-0,19	0,14
Гравий и мелкая галька	0,28	0,23-0,34	0,21

\* - данные [3].

Причина указанных различий может быть объяснена, если, исходя из подобия процессов рельефообразования и осадконакопления, предположить, что береговая зона водохранилищ (по крайней мере, крупных) является крупномасштабной моделью береговой зоны морей. Поэтому рассмотрим два разновеликих по площади водоема с характерными линейными размерами, выраженными в величинах длины разгона волн  $F_1$  и  $F_2$  по глубокой воде; причем  $F_1 > F_2$ . Допустим теперь, что ветер, дующий с более или менее постоянной скоростью  $W$  в направлениях  $F_1$  и  $F_2$ , привел к возникновению на этих водоемах штормового волнения. При таких условиях параметры ветровых волн с хорошей достоверностью можно оценить методом характерной волны в адаптированной для условий внутренних морей, озер и водохранилищ форме [12].

Согласно Г.В. Ржеплинскому с соавторами [12], зависимость средней высоты ветровых волн  $H$  от собственных характеристик волнообразующих факторов (в данном случае - от скорости ветра  $W$  и длины разгона  $F$  на глубокой воде) имеет вид

$$\frac{gH}{W^2} = k_1 \cdot \left( \frac{gF}{W^2} \right)^{1/3} \quad (1)$$

При тех же условиях развития волнения средний период волн  $T$  будет иметь величину, определяемую соотношением

$$\frac{gT}{W} = k_2 \cdot \left( \frac{gH}{W^2} \right)^{3/5} \quad (2)$$

где  $k_1, k_2$  – числовые константы;  $g$  – ускорение свободного падения.

Наконец, длину волн  $L$ , прошедших расстояние  $F$ , в линейном приближении, можно принять равной

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \quad (3)$$

В терминах физического моделирования водоем с линейным размером  $F_1$  является прототипом, а водоем с линейным размером  $F_2$  – моделью. Соответствие их собственных (геометрических) характеристик и соответствие между протекающими на прототипе и модели физическими процессами одного класса устанавливается соотношением, обычно называемым масштабным [13]:

$$N_x = \frac{X_p}{X_m} \quad (4)$$

где  $X$  – значение некоторого физического параметра;  $p$  и  $m$  – индексы соответствия параметра  $X$  прототипу и модели;  $N_x$  – масштаб параметра  $X$ .

Последовательно подставляя в (4) уравнения для высоты (1), периода (2) и длины (3) волны, записанные для водоемов с линейными размерами  $F_1$  и  $F_2$ , получим соотношения

$$N_H = N_F^{1/3}, N_T = N_H^{3/5}, N_L = N_F^2, \quad (5)$$

которые легко приводятся к виду

$$N_H^{1,2} = N_L = N_T^2 = N_F^{0,4}, \quad (6)$$

где  $N_H$ ,  $N_L$ ,  $N_T$  - масштабы высоты, длины и периода волн;  $N_F$  - масштаб длины разгона волн (горизонтальный масштаб).

Вертикальный масштаб можно определить как отношение глубин  $D_1$  и  $D_2$  в конечных точках пробега волн  $F_1$  и  $F_2$ , т.е., по условию задачи, на границе прибрежной зоны водоема прототипа и водоема-модели шириной  $l_1$  и  $l_2$ , соответственно. Полагая, что трансформация ветровых волн в нашем случае начинается на глубине  $D = 0,5 \cdot L$ , получим:

$$N_D = \left( \frac{D_1}{D_2} \right)^a = \left( \frac{L_1}{L_2} \right)^a. \quad (7)$$

Приравнявая выражения (6) и (7), найдем, что показатель степени  $a = 1$ , и выпишем масштабное соотношение в окончательном виде:

$$N_H^{1,2} = N_T^2 = N_L = N_F^{0,4} = N_D, \quad (8)$$

Выполнение соотношения (8) будет способствовать установлению подобия гидродинамической обстановки в прибрежной зоне водоема-прототипа и водоема-модели, свидетельством чего может стать равенство коэффициентов изменения высоты  $K_{SH}$ , длины  $K_{SL}$  и периода  $K_{ST}$  волн на водоеме-прототипе коэффициентам трансформации волн на водоеме-модели. В этой связи вычислим по методике [14] коэффициенты трансформации волн в прибрежной зоне водоема-прототипа и водоема-модели при следующих граничных условиях: (i) волны вызваны ветром со скоростью  $10 \text{ мс}^{-1}$  и подходят к внешней границе прибрежной зоны под углом  $60^\circ$  после пробега 150 км (внутреннее море) и 10 км (водохранилище), (ii) в прибрежной зоне сравниваемых водоемов изобаты параллельны и прямолинейны и (iii) протяженность профиля подводного берегового склона и средний уклон дна на водоеме-прототипе составляют 2882 м и 0.009, а на водоеме-модели - 212 м и 0.04, соответственно (данные наблюдений на Балтийском море и Новосибирском водохранилище). Результаты расчетов представлены в табл. 2 и не требуют обсуждения.

Очевидно, что достигаемое в сходных с теоретическими случаях подобие гидродинамических обстановок будет прежде всего проявляться в чертах рельефа береговой зоны водоема-модели. Однако поскольку подобие гидродинамических процессов на внешней границе прибрежной зоны водоема-прототипа и водоема-модели возможно лишь при искажении (сжатии) горизонтального масштаба, а вертикальный масштаб остается не искаженным, то средний угол наклона подводного берегового склона на водоеме-модели всегда будет больше, чем на водоеме-прототипе. Хорошо известно также, что параметры прибойного потока, формирующего береговые аккумулятивные формы, тесно связаны с собственными характеристиками волнения на глубокой воде, в зоне трансформации и обрушения подходящих к берегу волн, почему мы имеем тот же результат и для бермы пляжей.

Таблица 2

**Значения коэффициентов изменения высоты ( $K_{SH}$ ), длины ( $K_{SL}$ ) и периода ( $K_{ST}$ ) волн в прибрежной зоне водоема-прототипа и водоема-модели**

Координаты расчетных точек прибрежной зоны				$K_{SH}$		$K_{SL}$		$K_{ST}$	
Водоем-прототип		Водоем-модель		Водоем 1	Водоем 2	Водоем 1	Водоем 2	Водоем 1	Водоем 2
$X$ , м	$D$ , м	$X$ , м	$D$ , м						
2500	20.90	183.9	7.36	0.96	0.96	0.97	0.97	0.99	0.99
2000	16.72	147.1	5.88	0.93	0.93	0.94	0.94	0.98	0.98
1500	12.54	110.3	4.41	0.88	0.88	0.91	0.91	0.96	0.96
1000	8.36	73.6	2.94	0.84	0.84	0.87	0.87	0.96	0.96
500	4.18	36.8	1.47	0.80	0.80	0.77	0.77	1.00	1.00
400	3.34	29.5	1.18	0.81	0.81	0.74	0.74	1.01	1.01
300	2.51	22.1	0.88	0.83	0.83	0.68	0.68	1.02	1.02
215	1.80	15.8	0.63	0.84	0.84	0.60	0.60	1.02	1.02
175	1.46	12.9	0.52	0.90	0.90	0.55	0.55	1.03	1.03

Примечания: (i) водоем-1 и водоем-2 – водоем-прототип и водоем-модель, соответственно, (ii)  $X$ , м – удаление расчетной точки от уреза воды,  $D$ , м – глубина места

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Хабидов А.Ш. Динамические обстановки рельефообразования и осадконакопления береговой зоны крупных равнинных водохранилищ / А.Ш. Хабидов, Л.А. Жиндарев, А.К. Тризно. – Новосибирск: Наука, 1999. – 191 с.
2. Хабидов А.Ш. Геоморфология береговой зоны и побережий крупных сибирских водохранилищ / А.Ш. Хабидов, Л.А. Жиндарев, В.С. Кусковский, Г.И. Овчинников, В.М. Савкин, Ю.Б. Тржцинский. – Новосибирск: Наука, 2001. – 120 с.
3. Зенкович В.П. Основы учения о развитии морских берегов / В.П.Зенкович. – М.: Изд-во АН СССР, 1962. – 711 с.
4. Леонтьев О.К. Основы геоморфологии морских берегов / О.К. Леонтьев. – М.: МГУ, 1961. – 4 18 с.
5. Schwartz M.L. The encyclopedia of beaches and coastal environments / M.L.Schwartz. – Strondburg, 1982. – 940 p.
6. Pettijohn F.J. Sedimentary rocks / F.J. Pettijohn. - New York: Harper & Row, 1957. – 718 p.
7. Reineck H.-E. Depositional sedimentary environments with reference to terrigenous clastics / H.E. Reineck, I.B. Singh. – Berlin-Heidelberg-New-York: Springer-Verlag, 1973. – 428 p.
8. Howard J.D. Depositional facies of high energy beach-to-offshore sequence, comprison with low energy sequence / J.D. Howard, H.-E. Reineck // Bull. Amer. Ass. of petroleum geol., 1981. – Vol.65. – P. 807-830.
9. Долотов Ю.С. Динамические обстановки прибрежно-морского рельефообразования и осадконакопления / Ю.С. Долотов. – М.: Наука, 1989. – 269 с.
10. Лонгинов В.В. Динамика береговой зоны бесприливных морей / В.В. Лонгинов. – М.: Изд-во АН СССР, 1963. – 379 с.
11. Печеркин И.А. Теоретические основы прогнозирования экзогенных геологических процессов на берегах водохранилищ / И.А. Печеркин, А.И. Печеркин, В.И. Каченов. – Пермь: Изд-во Пермского гос. ун-та, 1980. – 85 с.
12. Ржеплинский Г.В. Новый метод анализа и расчета элементов ветровых волн / Г.В. Ржеплинский, Ю.М. Крылов, Г.В. Матушевский, С.С. Стрекалов, Л.Н. Назаретский // Тр. ГОИН. – 1968. – Вып. 93. – С. 5-52.
13. Huges S.A. Physical models and laboratory techniques in coastal engineering / S.A.Huges. – Singapore: World Scientific, 1993. – 568 p.
14. Крылов Ю.М. Ветровые волны и их воздействие на сооружения / Ю.М.Крылов, С.С.Стрекалов, В.Ф.Цыплухин. – Л.: Гидрометеиздат, 1976. – 256 с.

**MAIN FEATURES OF THE LARGE MAN-MADE LAKES SHORES**

**A.Sh. Khabidov, K.V. Marusin**

*On the large man-made lakes the most typical are the shores formed by the waves and wave-induced currents. Main features of the relief as well as the structure and texture of recent sediments of the shore are similar to the ones of the sea shore. However, the coasts of seas and inner water bodies have different morphometry. This is because of a pronounced effect of wind waves occurred on areas of water characterized by different linear dimensions.*