

Задание на 29.10.2020 г.

**Работы на проверку представляем в рукописном сканированном варианте или в Word, затем после получения разрешения, размещаем в личном кабинете, предварительно переводим графику и текст в PDF.**

## **Лекция: АБРАЗИЯ И ПЕРЕРАБОТКА БЕРЕГОВ ВОДОХРАНИЛИЩ**

В прибрежной зоне естественных водоемов (морей, озер) происходит разрушение горных пород, слагающих берега в результате процесса *абразии* (лат. abrasio – соскабливание), связанного главным образом с волноприбоем. Аналогичный процесс, развивающийся на берегах водохранилищ называется – *переработкой берегов*.

К основным факторам формирования берегов морей и других водоемов по Г.С. Золотареву (1983) относятся:

### *Гидрологические:*

– уровенный режим водоема, зависящий от эвстатических колебаний (многолетних, вековых колебаний уровня мирового океана в результате таяния или формирования материковых ледников), отливов и приливов, сгонно-нагонных изменений уровня, сработки и подъема уровней в водохранилищах и озерах;

– волновой режим, определяемый: высотой, длиной, повторяемостью, энергией волн ветровых и сейсмических, особенностями гидромеханического их воздействия на отмель и береговой уступ (клиф);

– течения вдольбереговые, придонные и другие с разными скоростями и энергией;

– наносы и закономерности их формирования, перемещения и аккумуляции, характеристика баланса;

– воздействие льда на берег и сооружения на нем расположенные.

### *Геологические:*

- геологическое строение берега, включающее: комплексы пород, их фаціальную изменчивость, залегание и трещиноватость;
- неотектонические движения;
- физико-механические свойства пород, в первую очередь сопротивляемость волновому размыву и их изменение в результате выветривания, разуплотнения и выщелачивания;
- непрерывно изменяющийся рельеф подводной и надводной частей берега.

*Техногенные:*

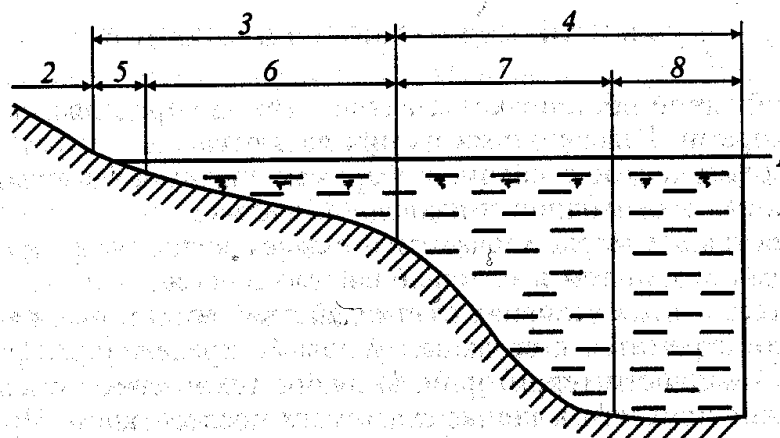
- возведение на надводной и подводных частях берега различных инженерных сооружений, в том числе защитных, существенно изменяющих воздействие водоема, перемещение наносов и отсыпки обломочных масс для их пополнения;
- разрушающее воздействие химических и биогенных факторов на породы отмели и берегового уступа;
- растительность на надводной части берега и на отмели, ослабляющая эрозионное и волновое воздействие волн.

## **1. 1. Основные понятия и гидрологические факторы**

Береговой линией называется линия, вдоль которой соприкасаются водоём и суша. Она находится в литоральной зоне. Её положение не постоянно во времени и зависит от характера современных и новейших движений земной коры, приливов и отливов и др. Во внутренних водоёмах изменение положения береговой линии может быть обусловлено климатогидрологическими факторами, а в водохранилищах – сработкой уровней воды.

В океанических бассейнах, наряду с литоральной зоной (рис. 1), выделяют следующие элементы рельефа морского дна: шельф, континентальный склон и океаническую платформу. Интенсивность

абразионных процессов в первую очередь зависит от строения литоральной зоны.



**Рис. 1. Главные элементы рельефа океанических бассейнов**

**1 – уровень моря, 2 – суши, 3 – мелководная зона, 4 – глубоководная зона, 5 - литоральная зона, 6 – шельф, 7 – континентальный склон, 8- океаническая платформа**

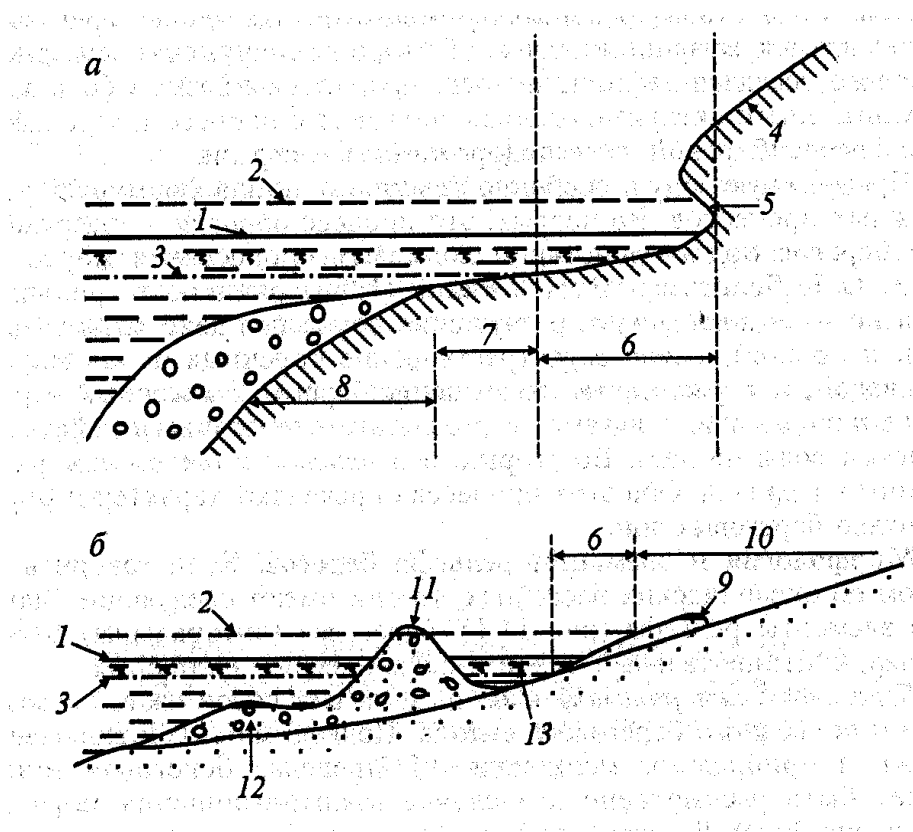
В зоне взаимодействия океанов, морей и озер с сушей выделяются следующие элементы [9]:

- 1) подводный склон с разнообразной морфологией, измененный процессами абразии и аккумуляции;
- 2) береговая отмель – абразионная, абразионно-аккумулятивная;
- 3) абразионный уступ (клиф) разной высоты и крутизны.

В зависимости от действующих природных факторов берега (рис. 2) могут быть абразионными – а, сложенными прочными породами или аккумулятивными – б. На высоких крутых, приглубых берегах, при подходе к которым потери энергии волн незначительны, формируются волноприбойные ниши. Последующее обрушение нависающего над нишей карниза приводит к формированию берегового уступа – клифа. Одновременно в результате абразии формируется полого наклонная к морю абразионная терраса – бенч. По границе берегового уступа и бенча формируется пляж, сложенный обломочным материалом (валуны, галька, гравий, песок). Часть обломочного материала с пляжей в штормы

перемещается на подводную аккумулятивную террасу или уносится вдольбереговыми течениями.

На отмелях равнинных берегах, пляжи которых сложены рыхлым мелкообломочным материалом, в зоне наката формируются береговые валы, а на подводной части отмели бары – подводные валы, выступающие над уровнем моря, за ними могут образовываться лагуны.



**Рис.2. Морфологические особенности литоральной зоны на высоких крутых (а) и отлогих (б) берегах**

1 – средний уровень моря, 2 – уровень прилива, 3 – уровень отлива, 4 – береговой уступ, 5 – волноприбойная ниша, 6 - приливно-отливная полоса, 7 – абразионная терраса, 8 - аккумулятивная терраса, 9 – береговой вал, 10 подводная приморская равнина, 11 – бар, 12 – подводный вал, 13 – лагуна.

Ведущим фактором из тех, что участвуют в формировании берегов, является ветровое волнение. Основными характеристиками волн (рис.3) являются: 1)  $L$  - длина волны, расстояние от гребня одной волны до гребня следующей; 2)  $h$  - высота волны, превышение гребня волны над ложбиной; 3)  $T$  - период волны, время, за которое волна переместится на расстояние, равное своей длине, сек; 4)  $\mathcal{G}$  - скорость распространения, путь который

волна совершает в единицу времени,  $\mathcal{G}=L/T$ , м/сек.; 5) энергия волны  $E$  - работа, производимая волнами.

Работа, производимая волнами (энергия волн) определяется из уравнения 1:

$$E=\frac{1}{8}\rho\cdot g\cdot h^2\cdot L, \quad (1)$$

где  $\rho$  - плотность воды.

По подсчетам В.П. Зенковича суммарная энергия морской волны высотой 6 м составляет 360 тыс. кгс.м, а мощность 240 л.с./м фронта волны.

При анализе абразирующего воздействия волн на породы отмели и надводных уступов следует учитывать силу их удара, оцениваемую как:

$$P=3\cdot h\cdot\left(1+\frac{h}{L}\right), \text{ т/м}^2 \quad (2)$$

по которой при  $h=6$  м и  $L=50$  м,  $P=19,1$  т/м<sup>2</sup>.

Вдольбереговые скорости течений могут достигать значительных величин – до 1,2-1,6 м/с и ориентировочно рассчитываются по формуле 3:

$$\mathcal{G}=K\cdot\left(\frac{m\cdot h^2\cdot\sin 2\alpha}{T}\right)^{\frac{1}{2}}, \quad (3)$$

где  $m$  - средний уклон дна;  $h$  - высота волн при разбивании;  $T$  - период;  $\alpha$  - угол между фронтом волн и линией берега;  $K$  - коэффициент, определяемый по формуле 4:

$$K=\sqrt[3]{\frac{0,871\cdot g\cdot s}{n}}, \quad (4)$$

где  $s$  - часть энергии, возбуждающей течение;  $n$  - коэффициент трения.

Таким образом, суммарная энергия волны определяется ее размерами, которые в свою очередь зависят от размера водной поверхности водоема

(длина разгона волны  $D$ , км), а также от его глубины в прибрежной зоне ( $H$ , м), скорости ветра ( $\omega$ , м/с) и его продолжительности ( $t$ , час).

Так, например, Берген [9] предлагает определять высоту и длину волны по следующим формулам 5, 6:

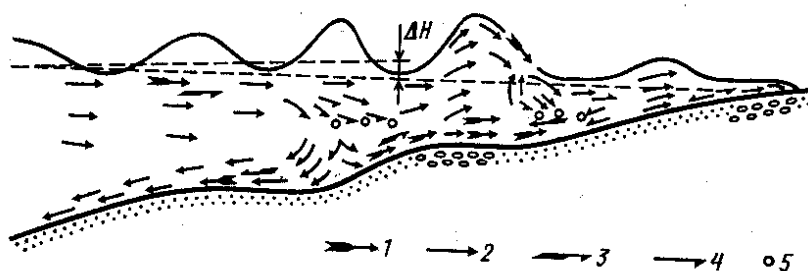
$$h = \frac{1}{\left(1 + \frac{67}{D}\right) \cdot \left(1 + \frac{186}{t}\right)}; \quad (5)$$

$$L = \frac{1234\omega}{\left(1 + \frac{47,9\omega}{D}\right) \cdot \left(1 + \frac{1331}{t}\right)} \quad (6)$$

По Стивенсону, высота волны в зависимости от длины разгона равна (7)

$$h = 0,37 \cdot \sqrt{D} \quad (7)$$

В прибойной зоне опрокинутые (разрушенные) волны (рис.3) в виде прибойного буруна накатываются на берег пенными языками, образуя заплеск.



**Рис.3. Схема движения водных масс волны на отмелом берегу и профиль равновесия отмели (по В.В. Логинову, 1954).**

- 1 - средние максимальные скорости; 2 – то же, предполагаемые;  
 3 – продольные переносы воды; 4 – то же, предполагаемые;  
 5 – вдольбереговые потоки;  $\Delta H$  – величина подъема уровня (нагона).

При этом поступательная скорость и высота вскатывания волны зависит от скорости ее распространения, высоты, уклона берегового откоса и его шероховатости. По Н.Н. Джунковскому, высота (м) вскатывания волны  $h_g$  над уровнем спокойной воды составляет (8):

$$h_g = 3,2 \cdot k \cdot h \cdot \operatorname{tg} \alpha \quad (8)$$

где  $k$  - коэффициент, зависящий от степени шероховатости откоса (для гладких бетонных поверхностей он равен 1, для набросок из рваного камня - 0,775, для поперечно-ребристых откосов - 0,665);

$h$  - высота волны, м;

$\alpha$  - угол наклона откоса.

## 1.2. Геологические и техногенные факторы

*Сопrotивляемость пород абразионному и эрозионному размыву* определяется их литологическими типами, степенью литификации, сложением, трещиноватостью, выветрелостью, размокаемостью и обводненностью, а также характером воздействия водных масс, значения коэффициентов размываемости рыхлых грунтов представлены в табл. 1 [17].

*Таблица 1*

*Коэффициенты размываемости (по Е.Г. Качугину, 1950)*

Класс	Характеристика породы	$K_p, \text{ м}^3/(\text{тс} \cdot \text{м})$
I	Очень легкоразмываемые: пески мелкозернистые, супеси легкие, лёссовые породы	0,0065-0,003
II	Легкоразмываемые: пески среднезернистые и супеси рыхлые, со щебнем	0,003-0,001
III	Средней размываемости: суглинки тяжелые, суглинки с валунами, глины и пески с гравием и галькой	0,001-0,0005
IV	Трудноразмываемые: песчаники глинистые, галечники с песком и валунами, глины с прослоями опок	<0,0005

Оценка опасности абразии может быть сделана по СНиП 22-01-95 (табл. 2).

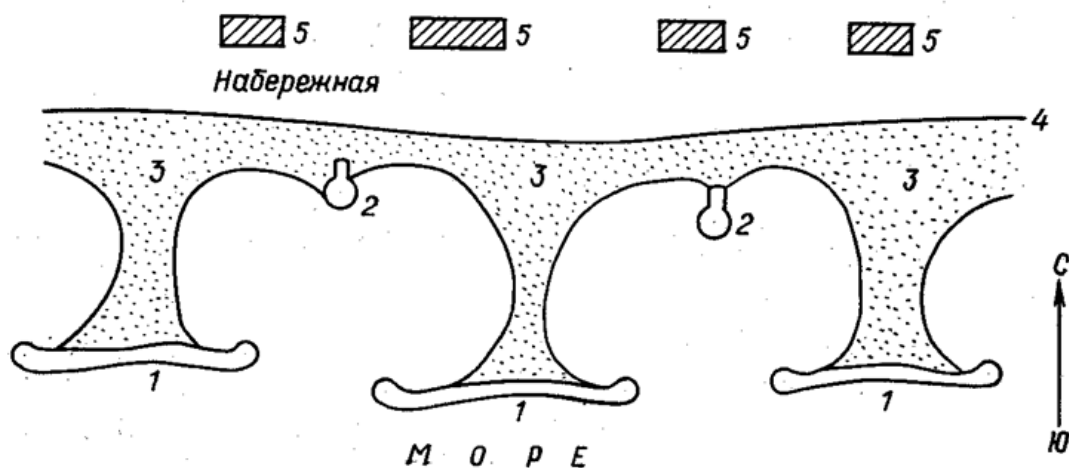
Таблица 2

Оценка опасности абразии (по СНиП 22-01-95)

Показатели, используемые при оценке степени опасности природного процесса (ОПП)	Категории опасности процессов			
	чрезвычайно опасные (катастрофические)	весьма опасные	опасные	умеренно опасные
Средняя скорость отступления береговой линии, м/год:				
пределы измерения	-	1 - 15	0,4- 3,8	0,05-1,8
средние значения	-	Более 2	2 - 0,5	Менее 0,5

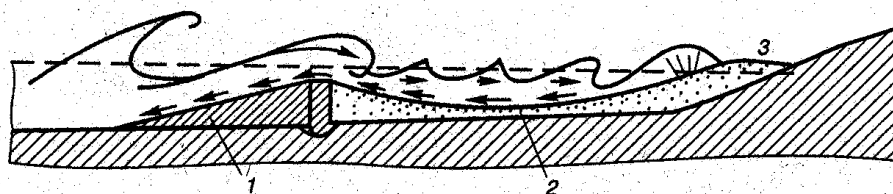
### 1.3. Методы защиты берегов от абразии

Для относительно приглубых и отмелых неоползневых берегов, сложенных размываемыми породами, с достаточно интенсивной абразией дна и уступа над пляжем эффективными мероприятиями являются: 1) создание защитного слоя наносов путем возведения бун и волноломов (рис. 4, 5), обычно в сочетании с отсыпкой щебнистых или галечниковых масс; 2) возведение волноотбойных стен, достаточно заглубленных и с профилем, наилучшим образом отражающих удары волн для защиты наводного уступа.



**Рис. 4. Схема укрепления отмелых морских берегов в Испании у г. Марабелла, в Румынии и на других побережьях [1]**

T-образные буны волноломы из крупной глыбовой наброски; 2 - короткие круглые буны; 3 – песок отсыпанный в объем 120-150 тыс. м<sup>3</sup> на 1 км берега (потери за три года около 50 %); 4 – низкая защитная стена, оформляющая набережную; 5 – здания на набережной



**Рис. 5. Схема работы волнолома (по Ананьеву, Потапову, 2000)**

Предохранение от абразии высоких склонов со старыми и действующими оползнями, обвалами и осыпями – задача более трудная и предполагает: 1) собственно защиту берега от воздействия волн и течений; 2) укрепление оползневого и обвального склона путем проведения соответствующих инженерных мероприятий и др.

Очевидно, что, способы защиты берегов направлены либо непосредственно на укрепление береговых склонов, либо на гашение энергии волнения.

## **1.4. Методы прогноза переработки берегов водохранилищ**

### **1.4.1. Метод прогноза переработки берегов Г.С. Золотарева**

Метод Г.С. Золотарева [31] является одним из наиболее распространенных. Он основан на учете геологических, геоморфологических

и гидрологических данных и применим для равнинных и горных водохранилищ, расположенных в разных природных условиях. По этому методу переработку берега можно прогнозировать на два срока: *через 10 лет после наполнения водохранилища и на конечный срок, т.е. когда скорость разрушения берега не будет иметь практического значения.*

Сущность метода состоит в следующем. Для всех типичных в инженерно-геологическом отношении участков широкой части водохранилища подготавливаются инженерно-геологические разрезы (рис. 6).

Построение профиля прогноза на этих разрезах начинается с определения глубины расположения бровки уступа береговой отмели – точки *A*. Сразу произвольно определить местоположение этой точки трудно, поэтому построение профиля прогноза повторяют 2-3 раза, пока положение точки *A* не будет обосновано соответствующим образом, указанным ниже.



**Рис.6. Расчетная схема для прогноза переработки берегов водохранилищ по методу Г.С. Золотарева**

Метод рекомендуется для участков, сложенных легкоразмываемыми песками и суглинками, для 10-летнего срока глубину расположения точки *A* принимать равной 1,5 высотам волны 20 %-ной обеспеченности, т.е.

повторяемостью 20 раз в 100 лет. Для конечного срока переработки глубину расположения точки  $A$  следует принимать: а) для легкоразмываемых пород равной 2,5-3,0 высотам волны 5 %-ной обеспеченности; б) для трудноразмываемых пород – глин, мергелей и аналогичных пород – 2,0-2,5 высотам волны 1-2 %-ной обеспеченности. Для водохранилищ с малой сработкой уровней глубину расположения точки  $A$  для 10-летнего срока откладывают от линии НПП, а для конечного срока – от горизонта сработки безледного периода в маловодный год.

От точки  $A$ , под углом  $\alpha_1$  проводят линию, намечающую уступ подводной отмели, а под углом  $\alpha_2$  – ее поверхность. Линию под углом  $\alpha_2$  доводят до точки  $B$  (пересечение с первоначальной поверхностью склона).

От точки  $B$  до точки  $C$  (до пересечения с линией НПП) под углом  $\alpha_3$  намечают поверхность абразионной части отмели. Угол  $\alpha_3$  определяют в зависимости от степени размываемости пород, срока прогноза и высоты волны.

Выше точки  $C$  устанавливают зону наката волны. Высоту зоны наката вычисляют по формуле (8) Н.Н. Джунковского. Высота зоны наката равна примерно 0,3-0,4 высоты волны. Угол  $\alpha_4$ , т.е. угол наклона берега в зоне наката определяют по данным лабораторных исследований или по таблице. Г.С. Золотарев рекомендовал для 10-летнего срока ширину и высоту зоны наката волны принимать в 2 раза меньше, чем для конечного срока, т.е. рассчитанной по формуле Н.Н. Джунковского.

Над зоной наката выше точки  $E$  намечается надводный откос, контур которого устанавливают по углу естественного откоса пород  $\alpha_5$  ( $\alpha_6$ ) и форме, какую породы приобретают в естественных обнажениях.

Выполнив первое построение прогноза переработки берега для 10-летнего и конечного сроков, определяют соотношение площадей аккумулятивной части отмели  $F_1$  и размываемой части склона  $F_2$ . Если соотношение  $F_1:F_2$  соответствует принятому проценту аккумуляции (табл. 3), то построение и прогноз считается правильным. Если это соотношение не

соответствует принятому проценту аккумуляции, производят повторное построение, перемещая точку *A* ближе или дальше от берега, добиваясь нужного соотношения площадей аккумуляции и размыва. В этом заключается обоснование расположения точки *A* на профиле прогноза.

Таблица 3

Углы естественного откоса, принимаемые при построении профиля прогноза переработки берегов водохранилищ  
(по Г.С. Золотареву и Д.Н. Раша)

Породы	Угол откоса отмели, $\alpha_1$ , град	Угол наклона отмели $\alpha_2$ и $\alpha_3$ для стадий, град		Угол наклона зоны наката $\alpha_4$ для стадий, град		Аккумуляция, объем, %
		10-лет	конечной	10 лет	конечной	
Пески тонко- и мелко-зернистые, разно- и среднезернистые	<10-12	1°30'	1°	5°	3°	5-10
		3°	2°	6°	4°	10-15
Пески крупные, Галечник и щебень с песчаным заполнителем, Галечник и щебень с глинистым заполнителем	<18-20	5°	3°	10°	6°	15-20
		10-12°	8-10°	18-20°	15-18°	20-35
Пески, Супеси, Суглинки, Глины, Лессы	<8-10	5°	3°	10°	6°	15-20
		8-10°	6-8°	15-18°	14-16°	20-25
Супеси, Суглинки, Глины, Лессы	<8-10	1°30'	1°	4	3	3-5
		1°30'	1°	4	2-3	<3
		2°	1°30'	6	8	0
		1°30'	1°	4	2	<3

#### 1.4.2. Метод прогноза переработки берегов Е.Г. Качугина

Метод основан на следующем положении – интенсивность подмыва и разрушения берегов водохранилищ пропорциональна энергии волнения в данном месте. Подмыв берегов во времени постепенно затухает и характеризуется кривой параболического типа.

Исходя из этих соображений, Е.Г. Качугин [17] разработал метод прогноза переработки берегов водохранилищ с учетом энергии волнения и размываемости пород, т.е. двух главных характеристик, определяющих развитие процесса абразии. Основой этого метода является эмпирическая формула 9:

$$Q = EK_p K_\sigma t^b, \quad (9)$$

где  $Q$  – количество размытой породы берега за время  $t$  лет, м<sup>3</sup>/м;

$E$  – средняя энергия волнения в данном пункте, тс·м;

$K_p$  – коэффициент размываемости пород;

$K_\sigma$  – коэффициент, учитывающий высоту берега;

$t$  – время размыва, годы;

$b$  – показатель степени меньше единицы, зависящий от скорости затухания размыва.

Определение прогноза переработки берега водохранилища проводится по следующей схеме:

1. Определение энергии волнения  $E$  в тонна-сила-метрах (тс·м) выполняется для каждого участка береговой зоны. Поэтому предварительно определяют высоту ветровых волн (обеспеченностью 0,1 %) по методу А.П. Браславского, а затем величину энергии волнения с учетом данных о продолжительности действия ветра по специальному графику.

2. Под коэффициентом размываемости пород  $K_p$  Е.Г. Качугин понимает объем размываемой породы в кубических метрах, приходящийся на единицу энергии волнения в тонна-сила-метрах [м<sup>3</sup>/(тс·м)] в первый год наполнения водохранилища, когда еще нет сформировавшейся отмели, т.е.

$$K_p = \frac{Q}{E_1}. \quad (10)$$

Этот коэффициент рекомендуется определять по табл.1.

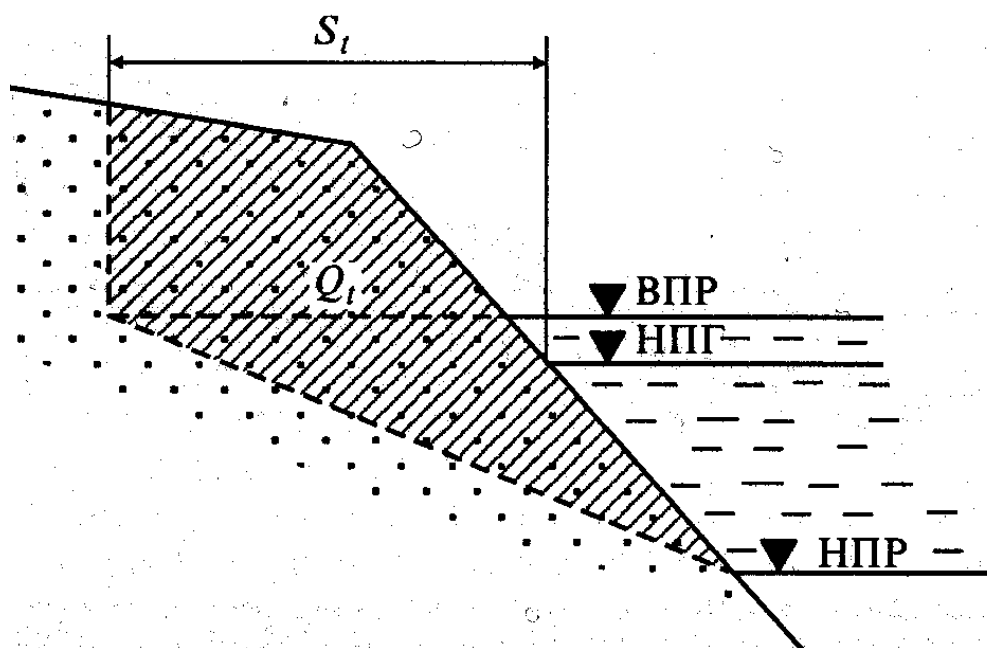
3. При разрушении берегов обычно образуется отмель, на которой волны теряют часть энергии. Поэтому коэффициент, учитывающий высоту берега  $K_b$ , косвенно отражает величину потери энергии волн на отмели. Этот коэффициент численно равен произведению средней высоты берега на некий множитель  $c$ :

$$K_b = h_b \cdot c. \quad (11)$$

Величина  $c$  изменяется от 0,03 для очень легкоразмываемых пород до 0,05 для трудноразмываемых. При высоте берега 30 м и более коэффициент  $K_b$  принимается равным 1.

Прогноз переработки берегов водохранилища производят на сроки 1, 10 лет и конечный. Показатель степени  $b$  при времени размыва  $t$  характеризует отношение ширины абразионной части отмели к ширине всей отмели и в среднем равен 0,7. Если отмель абразионная  $b$  достигает 0,95, а в случае аккумулятивной отмели этот показатель уменьшается до 0,45.

Определив основные данные для расчета количества размываемой породы в  $\text{м}^3$  на один погонный метр берега за время  $t$  (лет) на рассматриваемом расчетном участке и рассчитав объема пород, приступают к построению профиля прогноза (рис. 7). Для этого на расчетном инженерно-геологическом разрезе отмечают зону, в пределах которой возможен размыв берега. Границы этой зоны по вертикали определяют по амплитуде колебания уровня воды в водохранилище с поправками на высоту «рабочей волны»  $h_p$ , при которой происходит наибольший размыв (ВПР – верхняя поверхность размыва).



**Рис.7. Расчетная схема для прогноза переработки берегов водохранилищ по методу Е.Г. Качугина**

Высота рабочей волны определяется как:

$$h_p = 0,7 \cdot h_{cp} \quad (12)$$

За нижнюю границу зоны размыва (НПР) принимается положение низкого уровня 96-98% обеспеченности в безледный период, сниженное на высоту рабочей волны. От точки, где на расчетном разрезе отмечена нижняя граница размыва намечают абразионную часть отмели.

Дальнейшее построение производят путем подбора площади на профиле в квадратных метрах, численно равной объему размыва в кубических метрах для разных периодов времени –  $Q_1$ ,  $Q_{10}$ ,  $Q_{кон}$ . Угол наклона надводного откоса определяют по аналогии с такими же откосами, как и в методе Г.С. Золотарева.

Ширину зоны переработки определяют по расстоянию от уреза воды в водохранилище при НПГ до намечаемой бровки откоса.

## **1.5. Проектирование защитных мероприятий от абразии и переработки берегов**

Генеральная схема инженерной защиты предусматривает разработку принципиальных положений и разрабатывается в мелком масштабе. На этом этапе имеющиеся сведения дополняют данными рекогносцировочных обследований прибрежных зон с целью выявления мест интенсивного развития абразии.



Специальные схемы инженерной защиты содержат конкретные проектные решения по основным типам сооружений. Их обосновывают расчетами локальных и региональных прогнозов развития процесса на 10, 20 и более лет, включая конечную стадию. Основанием для выполнения таких расчетов служат данные изысканий и режимных наблюдений.

Наиболее ответственными этапами обоснования инженерной защиты являются проект и рабочая документация, на которых утверждаются конкретные проектные решения по типам, конструкциям, параметрам и компонентам сооружений защиты. Основные масштабы исследований для разработки проекта – 1:1000 – 1:5000, рабочей документации – 1: 1000. На этих этапах изыскания проводятся не только на участке предполагаемого

строительства, но и на прилегающей территории в зонах возможного воздействия проектируемых сооружений на развитие береговых процессов и подпор подземных вод.

В России в настоящее время для защиты берегов водохранилищ от размыва наиболее часто применяются дамбы, облицовка береговых откосов, одерновка, отсыпка камнем и песком и на отдельных участках — сооружение ряжей. На Байкале широко применяются ряжи, волноотбойные стенки, волноломы и буны. В последние годы вдоль юго-восточного берега озера, по которому проходит Транссибирская магистраль, ведется интенсивная отсыпка рваного камня.

### **Контрольные вопросы**

1. Дайте определение понятию «абразия».
2. Какие факторы влияют на развитие процесса абразии?
3. От чего зависит интенсивность абразии?
4. Какие защитные мероприятия используют при защите от абразии?
5. Какие методы существуют для прогноза переработки берегов водохранилищ?
6. В чем сущность прогноза переработки берегов водохранилищ по методу Г.С. Золотарева?
7. Что лежит в основе метода прогноза переработки берегов водохранилищ по Е.Г. Качугину?
8. Как определяется энергия волнения и от чего она зависит?
9. Как проектируют системы инженерной защиты размываемых берегов водохранилищ?

### **Рекомендуемая литература**

1. Бондарик Г.К. Инженерная геодинамика / Г.К. Бондарик, В.В. Пендин, Л.А. Ярг. – Москва: КДУ, 2007. – 440 с.

2. Золотарев Г.С. Инженерная геодинамика / Г.С. Золотарев. – Москва: МГУ, 1983. – 328 с.
3. Иванов И.П. Инженерная геодинамика / И.П. Иванов, Ю.Б. Тржцинский. – Санкт-Петербург: Наука, 2001. – 416 с.
4. Ломтадзе В.Д. Инженерная геодинамика / В.Д. Ломтадзе. – Ленинград: Недра, 1977. – 479 с.
5. Тржцинский Ю.Б. Инженерно-геологические особенности Иркутского амафитеатра / Ю.Б. Тржцинский, Е.А. Козырева, И.И. Верховин. – Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2005. – 124 с.
6. Учебное пособие по инженерной геологии / под ред. Г.С. Золотарева. – Москва: МГУ, 1990. – 294 с.

**Лабораторное: Завершаем работу по теме: «Графическая обработка результатов изучения трещиноватости....»**