

## МАСШТАБЫ И ДИНАМИКА РАЗВИТИЯ ЭКЗОГЕННЫХ ПРОЦЕССОВ НА ВОДОХРАНИЛИЩАХ БЕЛАРУСИ

**В.Е. Левкевич**

*Белорусский национальный технический университет,  
г. Минск, Беларусь, e-mail: eco2014@tut.by*

*В статье изложены результаты наблюдений и исследований за динамикой экзогенных эрозионных процессов на берегах водохранилищ Беларуси. Представлена математическая модель переработки берега, разработанная на основе закона сохранения.*

**Ключевые слова:** водохранилище; берег; абразия; масштаб; экзогенные процессы.

## THE SCOPE AND DYNAMICS OF EXOGENOUS PROCESSES DEVELOPMENT IN BELARUSSIAN WATER RESERVOIRS

**V.E. Levkevich**

*Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus*

*The article presents the results of observations and studies on the dynamics of exogenous erosion processes on the shores of the reservoirs of Belarus. A mathematical model for the processing of a coast, developed on the basis of the conservation law*

**Keywords:** reservoir; coast; abrasion; scale; exogenous processes.

В Беларуси водохранилища широко используются в целях мелиорации, рекреации, регулирования поверхностного и речного стока, рыбного хозяйства, технического и питьевого водоснабжения, а также для энергетических нужд. На данный момент эксплуатируется около 150 водохранилищ различного типа с общей площадью около 2500 км<sup>2</sup> и полным объемом 10 км<sup>3</sup>. Протяженность береговой линии водохранилищ республики составляет более 1500 км, из них около 320 км (более 20 %) подвержено активным процессам переработки – абразии (рисунок 1).

Процессы, которые происходят в береговой зоне искусственных водных объектов, оказывают большое отрицательное воздействие на функционирование многих отраслей народного хозяйства, в результате чего происходит отторжение земель из сельскохозяйственного использования, возникает необходимость в переносе жилых и производственных зданий и пр. Важнейшим вопросом при решении вышеуказанной проблемы является прогнозирование развития береговых абразионно-эрозионных процессов на водных объектах и незащищенных откосах подпорных сооружений с оценкой масштабов их проявления.



**Рисунок 1. Переработка берегов Вилейского и Лепельского водохранилищ**

Многолетними наблюдениями автора установлено, что береговая линия водохранилищ на определенной стадии [1–4] стремится к равновесному состоянию. Количественным критерием при оценке равновесной береговой линии служит ее общая длина, являющаяся функцией от площади водоемов. Для оценки степени приближения длины береговой линии водохранилищ к равновесной нами был предложен показатель – коэффициент развития или устойчивости береговой линии ( $k_p$ ), который определяется отношением длины береговой линии водохранилищ, подверженной переработке ( $L_{абр}$ ), к длине аккумулятивных берегов ( $L_{акк}$ ) [2; 5–7]:

$$k_p = L_{абр} / L_{акк}. \quad (1)$$

Как показали наблюдения, проведенные автором на ряде водохранилищ страны аккумулятивные образования формируются исключительно из песчаного материала. Песчаный материал, перемещаясь вдоль уреза, заполняет объемы входящих углов, бухт, мелких заливов, устьев мелиоративных каналов. В случае огибания потоком наносов выступа берега происходит образование с подветренной стороны у заливов бухт, балок и оврагов аккумулятивных (веерных) кос. Такие образования распространены наиболее часто.

Оценивая устойчивость береговой линии в плане, нами принято, что исходная береговая линия, представляет собой кривую с чередованием мысов и заливов [2; 5; 7]. Одним из условий плановой устойчивости береговой линии водохранилища, соответствующим стадии равновесия, является выражение вида [2]:  $L_{абр} = L_{акк}$ . По величине коэффициента устойчивости  $k_p$  можно судить о состоянии береговой линии. При  $k_p \rightarrow 1$  береговая линия стремится к равновесной. В случае  $k_p > 1$  в первые 10–15 лет существования водохранилища преобладает абразионное выравнивание склонов. В связи с тем, что коэффициент  $k_p$  пропорционально связан с величиной  $k_{из}$ , общее и обязательное условие равновесной береговой линии может быть записано следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} L_{абр} / L_{акк} &= k_p \rightarrow 1 \\ L_1 / L_2 &= k_{из} \rightarrow 1 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где  $k_{из}$  – коэффициент извилистости береговой линии; равный отношению  $L_1$  и  $L_2$  – протяженности береговой линии (или их отрезков) по кратчайшей прямой и соответственно реально существующей. При уменьшении  $k_{pi}$  от начального значения  $k_{pi}$ , до  $k_{pi+1}$ , наблюдается изменение  $k_{из}$ . Соответственно с возрастанием  $t$  величина  $\Delta S_i$ , (величина переработки берега) а равнозначно и  $\Delta L_i$ , (величина аккумуляции) стремятся к 0. Между размывом мысов и занесением заливов материалом переработки берегов, характеризующихся величинами  $L_{акк}$  и  $L_{абр}$ , соблюдаться соотношение (2), так как с возрастанием  $L_{абр}$  происходит увеличение  $L_{акк}$ . На более поздних стадиях (при сформировавшейся береговой отмели) происходит развитие вдольбереговых потоков наносов. Тогда балансовое уравнение наносов, перемещаемых вдоль береговой линии, подверженного абразии на стадии равновесия, соответствующей конечному периоду ( $t_k$ ), представляется в виде [3; 4]:

$$\int_{t_H}^{t_k} (\sum Q_{акк} + dQ_{акк}) dt = \int_{t_H}^{t_k} (\sum Q_{абр} + dQ_{абр}) dt \pm \Delta Q_{абр}, \quad (3)$$

где  $\sum Q_{акк}$ ,  $\sum Q_{абр}$  соответственно величины объемов аккумуляции в подводной части профиля материала переработки и объем абразии в надводной части склона,  $m^3$ ,  $\Delta Q_{абр}$  – невязка баланса наносов в результате поперечного сноса материала переработки в чашу водоема,  $m^3$ ,

Форма подводной части берегового склона, сложенного несвязными однородными грунтами может определяться на основе дифференциального уравнения деформации профиля берега, предложенного В.Л. Максимчуком [7].

Уравнение (3) соблюдается при выполнении следующих начальных и конечных условий:

$$\left. \begin{array}{l} k_{pn} > k_{pk} \\ k_{визк} < k_{визн} \end{array} \right\} \quad (4)$$

где  $k_{pn}$ ,  $k_{визн}$ ,  $k_{pk}$ ,  $k_{визк}$  – значения коэффициентов на начальный  $t_n$  и конечный  $t_k$  периоды соответственно.

При анализе динамики развития берегового процесса было установлено, что период формирования береговых склонов, подверженных переработке можно разбить на ряд стадий. Автором [2; 4; 5] выделяется 3 *стадии развития абразионного берега* (рисунок 2): I-я стадия начальной интенсивной переработки, II-я стадия затухания переработки и III-я стадия стабилизации процесса переработки и выработки профиля динамического равновесия [7].

При сформированной береговой отмели наблюдается развитие вдольбереговых потоков наносов, которые образуют в береговой зоне различные аккумулятивные формы, что определяет общую тенденцию выравнивания береговой линии водохранилищ (рисунок 3).

Наряду с плановым равновесием береговой линии существует профильное равновесие берегового склона. При этом соотношение элементов профиля выражается зависимостью вида:  $Q_t / S_t = f(B_{nt} / B_{нт})$ , где  $B_{nt}$ ,  $B_{нт}$  – соответственно ширина подводной и надводная частей береговой отмели. Отношение  $S_b$  к  $B_{нт}$  в условиях равнинных водохранилищ страны, которые

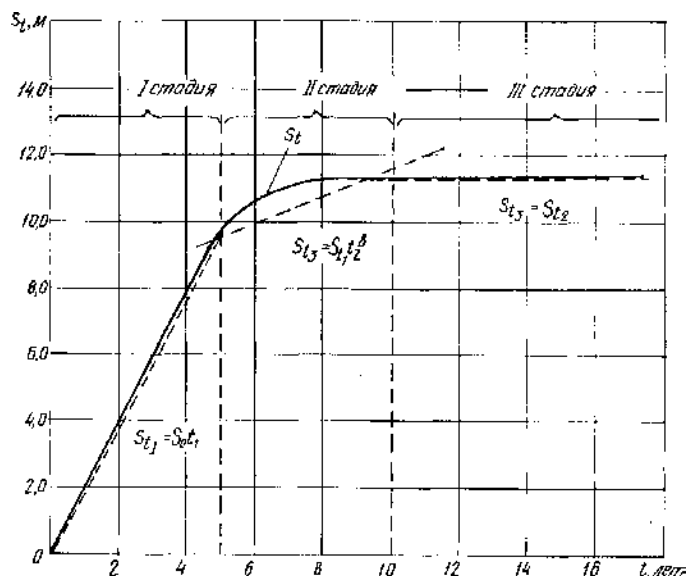


Рисунок 2. Схема стадийности развития переработки берега в условиях водохранилищ Беларуси



Рисунок 3. Вдольбереговое перемещение продуктов абразии в виде аккумулятивных кос. Петровичское водохранилище (съемка 2014 г.)

относятся к категории малых, находится в пределах 0,80–0,96, в отличие от крупных водохранилищ, где оно составляет 0,48–0,77. Физическая сущность этого явления состоит в том, что отношение объема грунта в надводной части  $Q_{абр}$  к объему в подводной части  $Q_{ак}$  характеризуется величиной коэффициента аккумуляции  $\xi$  [2; 3].

Наличие данного факта говорит об особенностях профиля равновесия, формируемого на водохранилищах Беларуси. В частности, профиль равновесия в условиях водных объектов Беларуси имеет малую аккумулятивную призму, что объясняется особенностями режима движения наносов в береговой зоне.

В этой связи приведенное выше соотношение косвенно определяет степень аккумуляции материала переработки берега, которая характеризуется величиной коэффициента аккумуляции –  $\xi$ , физический смысл которой определен Н.Б. Кондратьевым, Е.Г. Качугиным, Б.А. Пышкиным, В.Л. Максимчуком и другими.

Существенным в процессе формирования равновесного профиля берега следует считать связь между процессами переработки надводной части берегового склона и аккумуляции материала абразии в береговой зоне. Построение математической модели основывалось на законе сохранения [1; 2; 5] с учетом стадийного развития профиля переработки берегового склона [2; 7].

В общем случае процесс стадийности развития берега определяется режимом движения наносов и наличием как вдольберегового  $Q_x$ , так и поперечного  $Q_y$  потока наносов в береговой зоне. Для первой стадии характерно соотношение вида:  $Q_x = 0, Q_y > 0$ ; для второй стадии:  $Q_x \neq 0, Q_y > Q_x$ ; для третьей:  $Q_x > Q_y, Q_y \neq 0$ .

Схема формирования абразионного берегового склона водохранилища, изображена на рисунке 4. Принимая, что на I-ой стадии развития берега отсутствует вдольбереговой перенос материала размыва и преобладает процесс переработки, т. е.  $Q_x = 0, Q_y > 0$ , обращаясь к уравнению баланса наносов в береговой зоне [2; 3], имеем

$$Q_{ак} = \text{grad } Q_x + Q_{абр}. \quad (5)$$

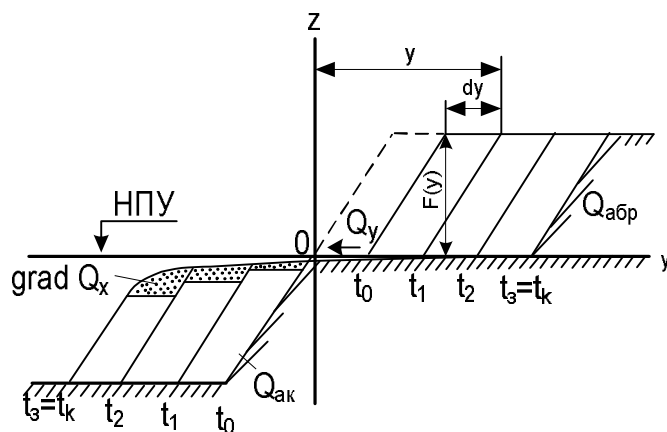


Рисунок 4. Расчетная схема формирования абразионного берегового склона

Считая, что для 1-ой стадии величина вдольберегового потока наносов, характеризуемого величиной  $\text{grad } Q_x = 0$ ; имеем  $Q_{ак} = Q_{абр} \xi_1$ , где  $\xi_1$  – коэффициент аккумуляции  $\xi_1 = 1$  (рисунок 4):

$$Q_{абр} = \int_{y_0}^{y_1} F(y) dy, \quad (6)$$

где  $F(y)$  – высота размываемого элементарного блока;  $dy$  – величина линейной переработки на  $i$ -ой стадии;  $t_0, t_1$  – время начала и окончания  $i$ -ой стадии. На 2-ой стадии формирования профиля равновесия величина  $\xi_2$  принимается равной  $\xi_2 = \xi_1$ . Тогда имеем:

$$Q_{\text{абр}} = \int_{y_1}^{y_2} F(y) dy. \quad (7)$$

На 3-ей стадии формирования равновесного профиля, т. е. на стадии затухания и формирования профиля динамического равновесия, когда преобладает вдольбереговой перенос наносов ( $Q_x > Q_y > 0$ ), уравнение баланса наносов в береговой зоне оценивается выражением вида

$$Q_{\text{ак}} = \text{grad } Q_x + \xi \int_{y_2}^{y_3} F(y) dy, \quad (8)$$

где  $\text{grad } Q_x$  – объем вдольберегового потока наносов на конечной стадии переработки склона [5],  $\text{м}^3$ ;  $\xi$  – коэффициента аккумуляции материала переработки на профиле.

**Заключение.** Таким образом, в результате анализа данных многолетних наблюдений за процессом берегоформирования были:

- разработаны и сформулированы основные теоретические положения развития абразионных береговых склонов водохранилищ страны;
- разработана математическая модель формирования профиля, динамического равновесия берега водохранилища, подверженного переработке.

#### Список литературы

1. Левкевич В.Е., Михневич Э.И. Закономерности развития деформаций грунтовых откосов дамб и плотин и естественных береговых склонов в условиях водных объектов Беларуси // Актуальные научно-технические и экологические проблемы сохранения среды обитания : сб. докл. IV Междунар. науч.-практ. конф. – Брест: БрГТУ, 2013. – С. 122–125.
2. Левкевич В.Е. Динамическая устойчивость берегов водохранилищ Беларуси. – Минск: Право и экономика, 2015. – 306 с.
3. Левкевич В.Е. Некоторые аспекты теории процесса берегоформирования в условиях малых равнинных водохранилищ // Водные ресурсы. 1992. № 3. – М.: РАН, 1992. – С. 119–126.
4. Левкевич В.Е. Основы теории развития берегов малых водохранилищ и ее приложения к водным объектам Полесья // Проблемы Полесья. 1990. Вып. 13. – Минск, 1990. – С. 143–152.
5. Максимчук В. Л. Рациональное использование и охрана берегов водохранилищ. – Киев, 1981. – 112 с.
6. Рагозин А.Л. Общие закономерности формирования и количественная оценка природных рисков на территории России // Проблемы анализа риска. 2008. Вып. 4. – М.: Деловой экспресс, 2008. – С. 74–104.
7. Широков В.М., Лопух П.С., Левкевич В.Е. Формирование берегов малых водохранилищ лесной зоны. – СПб.: Гидрометеиздат, 1992. – 160 с.