

БАЛАНСОВЫЕ МОДЕЛИ РАВНОВЕСНОЙ УСТОЙЧИВОЙ БЕРЕГОВОЙ ЛИНИИ ВОДОХРАНИЛИЩ

В.Е. Левкевич, доктор технических наук
Белорусский национальный технический университет,
г.Минск, Беларусь

Аннотация

Приведены принципы построения балансовых математических моделей расчета профиля равновесия абразионного берега и равновесной устойчивой береговой линии водохранилищ Беларуси, основанных на законе сохранения масс.

Ключевые слова: математическая модель, закон сохранения, балансовая модель, профиль равновесия, берег, водохранилище, переработка, гидрологический режим

Abstract

V.E. Levkevich

BALANCE MODELS OF THE STABLE EQUILIBRIUM COAST LINE OF RESERVOIR

The main principles of balance mathematical models for calculating the equilibrium profile of the abrasion coast and the equilibrium stable shoreline of reservoirs of Belarus based on the law of conservation of masses are given.

Keywords: mathematical model, conservation law, balance model, equilibrium profile, shore, reservoir, processing, hydrological regime

Введение

На основе закона сохранения массы и материалов фактических наблюдений за переработкой берегов водохранилищ Беларуси были разработаны балансовые математические модели формирования профиля равновесия и равновесной береговой линии. В основе моделей профильного и планового равновесия абразионного берега было использовано балансовое уравнение сохранения масс, предложенное ранее для морских условий И.О. Леонтьевым и интерпретированное автором настоящей статьи для условий водохранилищ Беларуси.

Основная часть

Целью исследований явилась разработка теоретического обоснования формирования профиля равновесия берега и устойчивой береговой линии, вырабатываемых в условиях водохранилищ Беларуси, необходимого для принятия решений по берегозащите.

Состояние береговой линии любого водохранилища определяет как *профильное* равновесие, так и *плановое равновесие* берегового склона, подвергающегося переработке. Физическая сущность профильного равновесия состоит в том, что размыв надводной части профиля, который характеризуется величиной линейной переработки берега S_t или объемом переработки Q_t , связан с ростом и образованием подводной части профиля – береговой отмели. При этом соотношение элементов профиля выражается зависимостью вида: $Q_t/S_t = f(B_{nt} / B_{nt})$, где B_{nt} ,

B_{nt} – ширина подводной и надводной частей береговой отмели соответственно, м. Отношение S_t к B_{nt} в условиях водохранилищ страны находится в пределах 0,80–0,96. У крупных водохранилищ европейского континента оно составляет 0,48–0,77. Присутствие такого различия свидетельствует об особенностях профиля равновесия водохранилищ Беларуси, имеющих обжатую, компактную форму и малую аккумулятивную призму. Приведенное выше соотношение определяет степень аккумуляции материала переработки берега, которая характеризуется коэффициентом аккумуляции ξ' [1–3], равным отношению объема размытого грунта в надводной части склона Q_{abr} к объему, отложившемуся в подводной части откоса $Q_{ак}$. Таким образом, в результате разрушения надводной части берегового склона происходит формирование подводной составляющей профиля, который в процессе развития стремится к профилю равновесия [3, 4].

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{1}{l_*} \left(q_{EOL} + \frac{\Delta Q}{\Delta y} - q_* + Q_{ist} \right). \quad (1)$$

Слагаемые в правой части уравнения (1) характеризуют величины переработки и аккумуляции материала абразии на профиле [4, 5]. В уравнении сохранения массы (1) главными компонентами баланса массы служат *продольный градиент расхода наносов* на профиле q_x/x , *поперечный градиент расхода наносов* $\Delta Q/\Delta y$, а также эоловый транспорт на-

носов q_{EOL} в надводной части отмели, поперечный поток q_* на нижней границе отмели и другие источники поступления материала Q_{ist} . Их усредненный вклад в формирование элементарной полоски l_x активной части подводной береговой отмели шириной 1,0 м включен в уравнение сохранения массы [4–6].

Рассмотрим схему формирования типового профиля абразионного берегового склона водохранилища страны (рисунок 1). В общем случае процесс развития профиля, как отмечалось выше, определяется режимом движения материала переработки в прибрежной зоне в виде вдольберегового и поперечного потоков наносов.

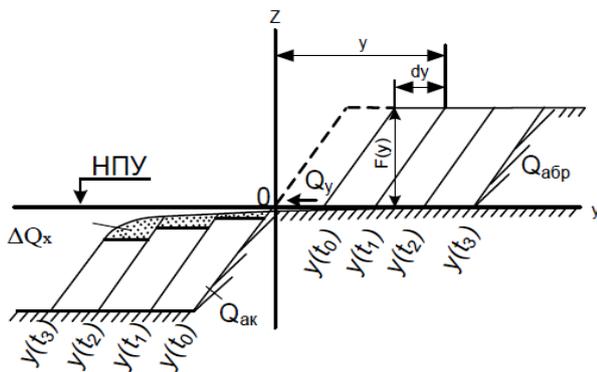


Рисунок 1. – Расчетная схема модели формирования профиля равновесия берега, подверженного переработке

Была принята следующая система координат: начало координат – точка уреза на начальной стадии; ось y – поверхность воды на отметках, наиболее повторяющихся в течение года в безледный период; ось x – направлена вдоль уреза воды и береговой линии; ось z – перпендикулярно водной поверхности. Тогда, обращаясь к уравнению баланса наносов на профиле, имеем [1-6]:

$$Q_{ак} = grad \Delta Q_x l_x + Q_{абр} \quad (2)$$

где $Q_{ак}$ – объем призмы аккумуляции, m^3 ; под величиной $grad \Delta Q_x$ понимается, в соответствии с [8] *продольный градиент* расхода наносов, m^2 ; l_x – элементарная продольная полоска отмели единичной ширины $l_x = 1,0$ м; $Q_{абр}$ – объем абразионной призмы, m^3 . Обозначим $grad \Delta Q_x l_x$ через ΔQ_{xt} – величину продольного элементарного объема наносов, m^3 .

Приняв, что для I-ой стадии развития профиля отсутствует вдольбереговой перенос материала и присутствует только процесс переработки, т.е. попе-

речное движение материала $Q_x = 0$, $Q_y > 0$, имеем: $grad \Delta Q_x l_x = 0$. При этом $Q_{ак} = Q_{абр} \xi'_1$, где ξ'_1 – коэффициент аккумуляции $\xi'_1 = 1$, определяемый соотношением $\xi'_1 = Q_{ак} / Q_{абр}$, зависящий от объема размыва надводной части склона. Считая, что объем размыва надводной части берега $Q_{абр}$ равен сумме объемов элементарных блоков размыва на отдельных стадиях (рисунок 1), имеем:

$$Q_{абр} = l_x \int_{y(t_0)}^{y(t_1)} F(y) dy, \quad (3)$$

где $F(y)$ – высота, dy – ширина элементарного блока размыва (величина линейной переработки) на i – ой стадии, $y(t_0)$, $y(t_1)$ – индексы интегрирования границы элементарного блока в начале и конце периода его переработки.

На II-ой стадии формирования профиля равновесия величина ξ'_2 принимается равной $\xi'_2 \approx \xi'_1$ в связи с чем, выражение (3) будет действительно и для второй стадии.

На III – ей стадии, т.е. на стадии формирования профиля *динамического равновесия* (стадии затухания переработки) при наличии сформированной береговой отмели и вдольберегового потока наносов ($Q_x > Q_y$; $\xi'_1 < 1$) (рисунок 1) уравнение (2) принимает вид:

$$Q_{ак} = \Delta Q_{xt} + l_x \xi'_3 \int_{y(t_2)}^{y(t_3)} F(y) dy, \quad (4)$$

где $y(t_2)$, $y(t_3)$ – границы элементарного блока переработки на III – ей стадии формирования склона, м; ΔQ_{xt} – объем вдольберегового потока наносов, приведенный к единичной ширине береговой отмели l_x , который определяется по эмпирической зависимости [6,7]:

$$\Delta Q_{xt} = 0,137 \cdot 10^{-5} \cdot l_x \cdot h_{1\%}^2, \quad (5)$$

где $h_{1\%}$ – высота волны 1%-ой обеспеченности, м.

Форма подводной части берегового склона из несвязных грунтов может определяться на основе дифференциального уравнения деформации берега, полученного для условий однородных грунтов [1, 2, 6], а также предложений В.В. Вайтман, полученных

для неоднородных несвязных грунтов [8, 9].

Полученная математическая балансовая модель профиля равновесия может использоваться при соблюдении следующих условий:

- в случае принадлежности водохранилищ 1-й и 2-й групп (классифицированных по уровенному режиму) к водоемам руслового, озерного и наливного типов [1–3];

- в случае наличия исходного берегового склона, имеющего обрывистую форму (высота обрыва от 0,5 до 15,0 м) либо пологую с уклоном поверхности от 0,1 до 0,33, или верховые незакрепленные грунтовые откосы дамб и плотин, имеющие заложения $m_2 = 2,5–15,0$;

- в случае развития переработки в несвязных песчаных грунтах различной крупности с включением гравелистых частиц с коэффициентом неоднородности размываемого грунта η от 2,5 до 4,5.

Было установлено, что в условиях нашей страны в начальный период эксплуатации водохранилища (руслового и озерного типов), как правило, береговая линия характеризуется высокой извилистостью, которая определяется исходным рельефом речных долин. Коэффициент извилистости береговой линии $k_{из}$, например Вилейского водохранилища, значительно различается по его длине. По правому берегу его значения находятся в пределах 1,16–2,05 при среднем взвешенном значении 1,39, по левому – 1,05–2,60 и 1,63 соответственно.

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

коэффициент развития береговой линии k_p , который определяется отношением протяженности аккумулятивных берегов $L_{ак}$ к длине береговой линии водохранилища, подверженной переработке $L_{абр}$, т.е. $k_p = L_{ак} / L_{абр}$ [3].

Ниже в таблице 1 приведены значения k_p , полученные автором для водоемов, с различным сроком эксплуатации водохранилища и стадии развития склона.

Как показали натурные наблюдения, проведенные автором на ряде водохранилищ страны, аккумулятивные образования формируются исключительно из песчаного материала – песков различной крупности. Глинистые, тонкодисперсные частицы ($d_{50} = 0,01–0,025$ мм) выносятся волновым потоком и течениями в открытую часть водоема. Песчаный материал, перемещаясь вдоль уреза, заполняет объемы входящих углов, бухт, мелких заливов, устьев мелиоративных каналов (рисунок 2). В случае обгibanия потоком наносов выступа берега происходит



Рисунок 2. – Вдольбереговое перемещение песчаных наносов в приурезовой зоне в форме рифелей. Заславское водохранилище. 2016 г.

Таблица 1. – Значения коэффициента развития береговой линии

| ВОДОХРАНИЛИЩЕ | Длина аккумулятивного берега, $L_{ак}$, км | Длина абразионного берега, $L_{абр}$, км | k_p |
|----------------------|--|--|-------------------------|
| Вяча | 1,30 | 1,50 | 0,86 |
| Дрозды | 0,85 | 1,20 | 0,70 |
| Заславское | 2,30 | 3,50 | 0,66 |
| Криницы | 0,60 | 0,80 | 0,75 |
| Лепельское | 2,70 | 3,0 | 0,90 |
| Осиповичское | 1,80 | 2,0 | 0,90 |
| Петровичское | 0,60 | 1,10 | 0,54 |
| Цнянское | 0,40 | 0,50 | 0,80 |
| Чижовское | 0,90 | 1,10 | 0,82 |

образование с подветренной стороны у заливов бухт, балок и оврагов аккумулятивных кос. Такие образования распространены наиболее часто (рисунок 3).



Рисунок 3. – Вдольбереговое перемещение продуктов переработки в виде аккумулятивных кос. Петровичское водохранилище. 2015 г.

При оценке устойчивости исходная береговая линия принята как кривая с чередованием мысов и заливов [1–4]. Одним из условий плановой устойчивости береговой линии водохранилища на стадии равновесия является выражение вида $L_{ак} = L_{абр}$.

Общую устойчивость береговой линии характеризуют коэффициент развития k_p и коэффициент извилистости береговой линии $k_{из}$, равный отношению протяженности реально существующей береговой линии L_1 (или ее отрезков) к кратчайшей прямой L_2 .

$$\left. \begin{aligned} L_{ак} / L_{абр} &= k_p \\ L_1 / L_2 &= k_{из} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

По величине коэффициента развития k_p можно судить о состоянии береговой линии. При $k_p \ll 1$ бере-

говая линия стремится к равновесной (таблица 1). В первые 10–15 лет существования водохранилища преобладает абразионное выравнивание склонов. Затем начинает доминировать аккумулятивное выравнивание.

$$\left. \begin{aligned} k_{рн} &< k_{рк} \\ k_{изн} &> k_{изк} \end{aligned} \right\}, \quad (7)$$

где $k_{рн}$, $k_{изн}$, $k_{рк}$, $k_{изк}$ – значения коэффициентов на начальный t_n и конечный t_k периоды соответственно.

Однако в природных условиях в процессе формирования *равновесной устойчивой береговой линии* наблюдается значительная асинхронность, так как на ранней стадии формирования *равновесного профиля* (первые 3–5 лет) основная масса материала переработки берегового склона (по оценкам автора до 98 % от объема, поступающего в береговую зону водохранилища) идет на образование подводной части береговой отмели, и лишь незначительная составляющая (не более 2–3 % от материала переработки) выносится в акваторию водоема. При сформированной береговой отмели происходит развитие вдольбереговых потоков наносов. Тогда *балансовая модель* береговой линии водохранилища на стадии равновесия, соответствующей периоду t_k , имеет следующий вид [3]:

$$\int_{t_n}^{t_k} \sum_{n=1}^N (Q_{абр,n}) dt = \int_{t_n}^{t_k} \left[\sum_{n=1}^N (Q_{ак,n} \pm \Delta Q_{ак,n}) \right] dt, \quad (8)$$

где $Q_{абр,n}$, $Q_{ак,n}$ – соответственно величины объемов аккумуляции материала переработки и объемов абразии, являющиеся функцией времени t для n -го контрольного створа на участке наблюдений, m^3 ; $\Delta Q_{ак,n}$ – невязка баланса за счет продольного переноса материала переработки по участку и поступлению эрозийного материала в береговую зону с прилегающих территорий, m^3 .

Невязка баланса по данным природных исследований приурочена стадиям развития берега и изменяется на различных этапах, составляя на первой стадии от 5–15 % (водохранилища: Дубровское – $\Delta Q_{ак,n} = 14$ %, Гродненской ГЭС – $\Delta Q_{ак,n} = 6$ %, Витебской ГЭС – 2%) от объема, поступающего в береговую зону водохранилища материала; до 60–80 % на стадии равновесия береговой линии за счет вдольберегового перемещения наносов (водохранилища За-

славское – $\Delta Q_{ак,п} = 79 \%$, Петровицкое – $\Delta Q_{ак,п} = 67 \%$, Солигорское – $\Delta Q_{ак,п} = 71 \%$). Данные натурных исследований на ряде водохранилищ страны, имеющих различный период эксплуатации и стадии развития береговой линии, подтверждают теоретическую зависимость (8), приведенную выше.

Уравнение (8) выполняется при соблюдении начальных и конечных условий (7). Период формирования береговых склонов, подверженных переработке, можно разбить на ряд стадий. Автором [1-3] выделяются 3 основные стадии развития абразионного берега, ход которых описывается графиком (рисунок 4). Выделены следующие стадии, которые характеризуются различной динамикой во времени:

- I-я стадия – начальной переработки,
- II-я стадия – интенсивной переработки,
- III-я стадия – затухания или стабилизации и выработки профиля динамического равновесия.

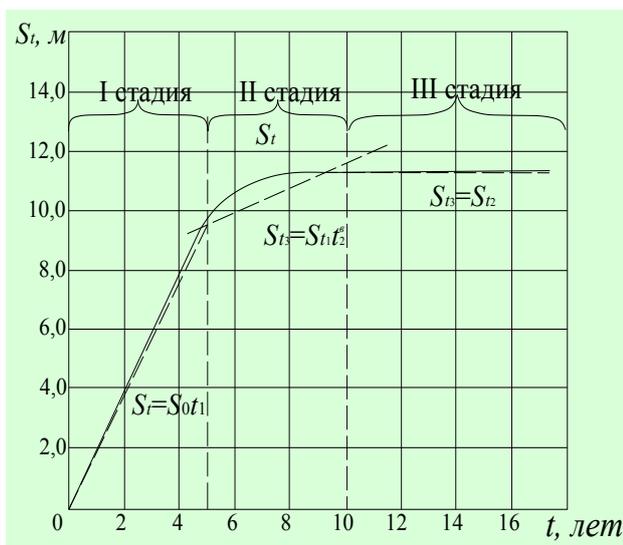


Рисунок 4. – Схема стадийности развития абразионного берега в условиях водохранилищ Беларуси

Процесс аккумулятивного выравнивания берегов, равно как и процесс абразионного, протекает также стадийно, при этом выделяются следующие три стадии (рисунок 4):

I – я стадия характеризуется только поперечным движением наносов в береговой зоне;

II-я стадия характеризуется фрагментарным вдольбереговым перемещением наносов и началом образования различных незамкнутых аккумулятивных форм: кос, перейм;

III – я стадия, завершающая образование равновесной береговой линии с формированием замкнутых аккумулятивных форм (пересыпей, заполнения входящих углов и других аналогичных форм).

Длительность стадий абразионно-аккумулятивного выравнивания береговой линии в общем случае охватывает период (в случае водоемов со значительной сработкой уровней) продолжительностью 20–25 лет (водохранилища Вилейское, Заславское, Лепельское, Солигорское, Гродненской ГЭС). При малых сработках уровня воды в водохранилищах этот период длится 15–20 лет (водохранилища Чигиринское, Осиповицкое, Дрозды, Петровицкое).

Как у морских берегов, так и на отмелях водохранилищ при воздействии поперечного и вдольберегового перемещения наносов [5–11] часть их накапливается, увеличивая уже сформировавшиеся отмели [3, 12]. Отмечено, что при длительной эксплуатации водохранилищ происходит окончательное формирование равновесной береговой линии с зонами питания, транспорта и аккумуляции наносов [1–4]. Термин «равновесная береговая линия» был заимствован автором из теории формирования морских берегов, предложенной В.П. Зенковичем [11].

Подтверждением взаимосвязи между абразионным и аккумулятивным типами берегов является блок-схема развития берегов, разработанная автором, учитывающая стадийность и асинхронность развития процессов во времени, представленная на рисунке 5 [1–3].

В первые 10–15 лет существования водохранилища происходит абразионное выравнивание склонов за счет активной переработки береговой линии, происходящей в результате уменьшения длины прогиба (занесения заливов наносами). В идеальных условиях это должно происходить синхронно с разрушением переработкой береговых склонов и перемещением вдоль уреза потока наносов. Однако в этом процессе наблюдается асинхронность [1, 2]. Поскольку на ранней стадии формирования равновесного профиля (первые 3–5 лет) часть материала переработки берегового склона $\Delta Q_{абр}$, поступающего в приузовую зону водохранилища, идет на образование подводной части береговой отмели, при этом некоторая доля материала выносится в акваторию водоема. На последующих стадиях развития берего-

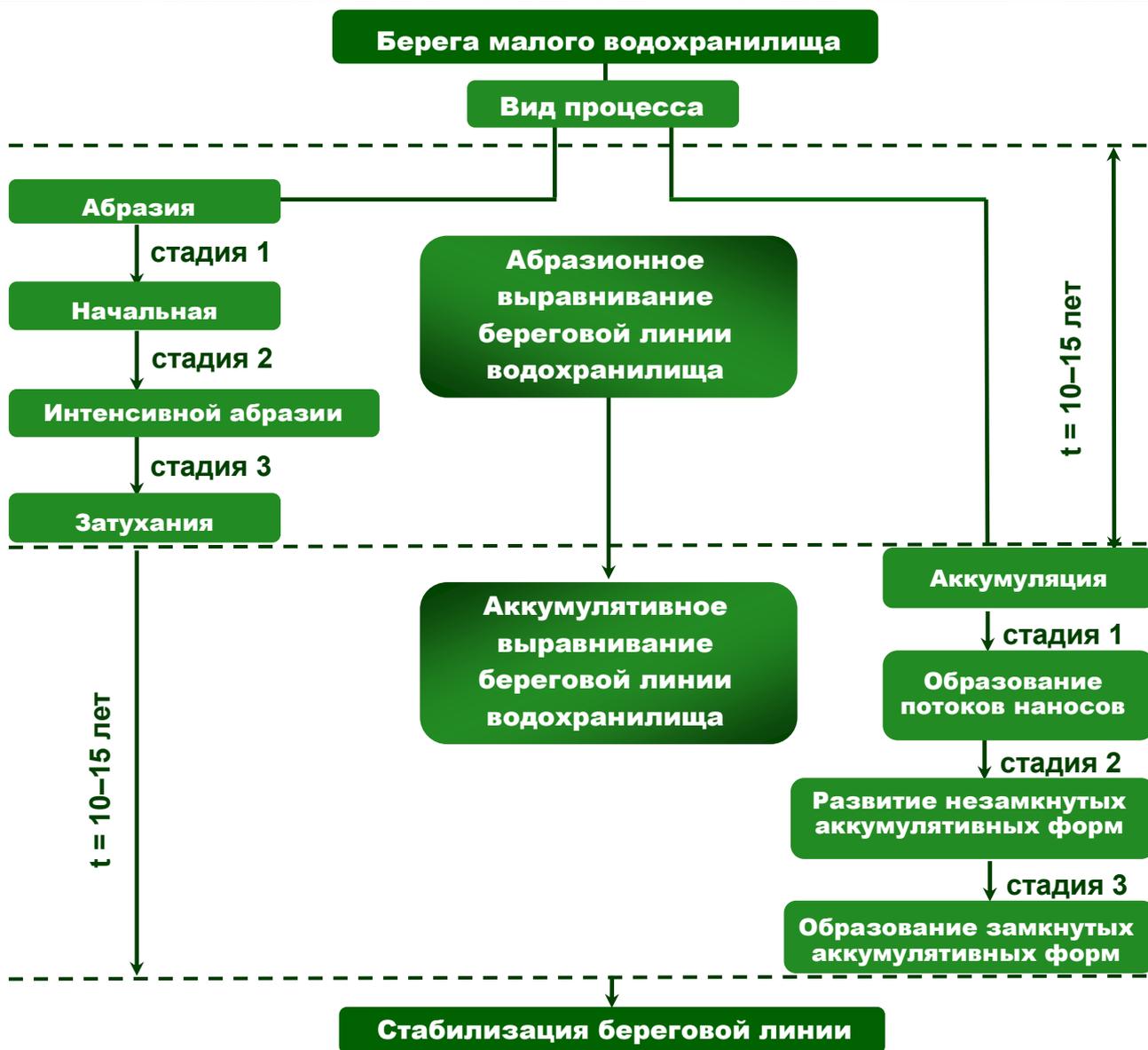


Рисунок 5. – Блок-схема развития равновесной береговой линии

вой линии при сформировавшейся развитой подводной части происходит вдольбереговое перемещение береговой отмели, наносов. Перемещаясь вдоль уреза под действием ветрового волнения и течений, материал переработки в виде потока наносов аккумулируется, что определяет общую тенденцию выравнивания береговой линии водохранилищ [1–3].

Заключение

1. Установлено, что период развития процесса переработки и формирования профиля равновесия можно разбить на ряд временных отрезков (стадий). Для условий водохранилищ Беларуси выделяют три основные стадии: начальная, интенсивной динамики и затухания (равновесия) [1–3]. Стадийность развития профиля равновесия определяет режим движения материала переработки по профилю в виде пото-

ка наносов с наличием как вдольбереговой составляющей Q_x , так и поперечной Q_y .

2. Автором разработаны математические (балансовые) модели формирования поперечного профиля динамического равновесия и профиля устойчивой береговой линии в плане, базирующиеся на законе сохранения массы с учетом поперечного и вдольберегового перемещения материала переработки в виде наносов. Сущность профильного равновесия состоит в балансе материала переработки надводной части профиля, характеризуемого величиной линейной переработки берега S_t или объемом размыва Q_t , и аккумуляции материала переработки с образованием подводной части профиля – береговой отмели, имеющей профиль динамического равновесия. В результате разрушения надводной части бе-

регового склона происходит формирование подводной составляющей профиля равновесия; при этом отношение объема размывтого грунта в надводной части $Q_{абр}$ берега к объему, переместившемуся в подводную часть профиля $Q_{ак}$, характеризуется величиной коэффициента аккумуляции. Разработана математическая балансовая модель профиля равновесия, основанная на принципах сохранения массы и балансовых соотношений между объемами размывтого грунта в надводной части $Q_{абр}$ берега и объемом грунта, переместившемуся в подводную часть профиля $Q_{ак}$ в результате переработки коренного берега.

3. На основании теоретических положений и закона сохранения разработана *математическая балансовая модель равновесной береговой линии*, и показано, что плановое равновесие береговой линии характеризуется соотношением вида $L_{ак} = L_{абр}$. Отно-

шение протяженности аккумулятивных берегов $L_{ак}$ к протяженности абразионных $L_{абр}$ автор предлагает характеризовать *коэффициентом развития k_p береговой линии*. По величине k_p можно судить о динамике и стадии берегоформирования. При $k_p \rightarrow 1$ береговая линия стремится к равновесной.

4. Установлено, что процесс формирования равновесной береговой линии происходит стадийно. Длительность стадий абразионно-аккумулятивного выравнивания береговой линии в общем случае охватывает (в случае водоемов со значительной сработкой уровней) период в 20–25 лет (водохранилища Вилейское, Заславское, Лепельское, Солигорское, Гродненской ГЭС). При малых сработках уровня воды в водохранилищах этот период длится 10–15 лет (водохранилища Чигиринское, Осиповичское, Дрозды, Петровичское).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Левкевич, В. Е. Динамика берегов русловых, наливных и озерных водохранилищ Беларуси / В. Е. Левкевич. – Минск : Право и экономика, 2015. – 202 с.
2. Левкевич, В. Е. Динамическая устойчивость берегов водохранилищ Беларуси / В. Е. Левкевич. – Минск : Право и экономика, 2015. – 307 с.
3. Левкевич, В. Е. Динамическая устойчивость берегов водохранилищ Беларуси: автореф. дис. ... докт. техн. наук : 05.23.07 / В. Е. Левкевич; Белорус. национальный техн. ун-т. – Минск, 2017. – 51 с.
4. Леонтьев, И. О. Прогнозирование эволюции берегов на основе математического моделирования / И. О. Леонтьев // Океанология. – 2006. – Т.46, № 4. – С. 603–611.
5. Леонтьев, О. К. Основы геоморфологии морских берегов / И. О. Леонтьев. – М., 1961. – 418 с.
6. Максимчук, В.Л. Рациональное использование и охрана берегов водохранилищ. – Киев : Будівельник, 1981. – 112с.
7. Пышкин, Б. А. Динамика берегов водохранилищ / Б. А. Пышкин // Киев : Наукова думка, 1973. – 416 с.
8. Вайтман, В. В. Моделирование переформирования поперечного профиля пляжа, сложенного неоднородными наносами / В. В. Вайтман, И. Г. Кантаржи // Обзорение прикладной и промышленной математики. – Т. 13, вып. 6. – С. 1060–1062.
9. Вайтман, В. В. Экспериментальные исследования влияния неоднородности наносов на переформирование поперечного профиля пляжа / Строительство в прибрежных курортных регионах: материалы 4-й международ. науч.-практ. конф., Сочи, 15–20 мая, 2006 г. / СГУТиКД. – Сочи, 2006. – С. 100–104.
10. Зенкович, В. П. Основы учения о развитии морских берегов / В.П. Зенкович. – М. : Изд-во АН СССР, 1962. – 710 с.
11. Лонгинов, В. В. Динамика береговой зоны бесприливных морей / В. В. Лонгинов. – М. : Изд-во АН СССР, 1963. – 379 с.
12. Кобяк, В. В. Прогноз абразионных процессов на водохранилищах с трансформированным уровнем режимом : автореф. ... дис. канд. техн. наук : 05.23.07 / В. В. Кобяк ; Белорус. нац. техн. ун-т. – Минск, 2013. – 22 с.

Поступила 15.06.2018