

УДК 627.8+631.459.31+530.17

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ АБРАЗИОННЫХ ПРОЦЕССОВ ВОДОХРАНИЛИЩ БЕЛАРУСИ МЕТОДОМ ПРИРОДНЫХ АНАЛОГОВ

**Кобяк В.В.**

**Командно-инженерный институт МЧС Республики Беларусь**

**e-mail: [mail@kii.gov.by](mailto:mail@kii.gov.by)**

*Изменение гидрологических условий на водохранилищах оказывает существенное влияние на развитие различных процессов: зон подтопления, заболачивания территории, изменения растительного мира в прибрежной зоне и т.д. Наиболее опасным является переформирование береговой линии. В работе предложен прогноз переработки береговых склонов на основе метода природных аналогов, построенный на использовании критериев подобия и берегоформирующих условий: морфологического, геологического и гидрологического сходства между объектом аналогом и прогнозируемым водоемом.*

*The hydrological conditions changing at existing reservoirs affect different processes development: marginal erosion, water logging zones, offshore strip vegetable kingdom changing, etc. The bank line reformation is one of the most dangerous. The marginal erosion processing prognosis based on the natural analogue method with similarity criteria usage is offered in the paper. Morphological, geological and hydrological similarities between the analogue object and predicted object are taken into account.*

(Поступила в редакцию 15 апреля 2010 г.)

### **ВВЕДЕНИЕ**

В настоящее время существует более 60 разнообразных методов прогноза процессов абразии, каждый из которых базируется на результатах натуральных и лабораторных исследований, математических и статистических расчетных данных. При этом установлено, что любой из методов имеет свои особенности, специфику и свойства. Анализ соответствия прогнозных расчетов различными методами [1–4] показал их удовлетворительную оправдываемость исключительно для условий крупных, но не малых равнинных водохранилищ Беларуси. В настоящей работе на основании разработанных критериев гидролого-геоморфологического подобия рассматривается прогноз переформирования берегов малых водохранилищ Беларуси на основе метода природных аналогов.

### **МЕТОДЫ ПОДОБИЯ ПРИ ПРОГНОЗИРОВАНИИ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕРАБОТКИ БЕРЕГОВ ВОДОХРАНИЛИЩ**

Для анализа геологического моделирования переработки береговых склонов крупных водохранилищ разработан метод геологического подобия [5, 6], содержащий пять основных критериев подобия для прогнозирования процессов берегоформирования. Применение этого метода отчасти затруднялось сложностью выбора прогнозируемого участка (аналога) и инженерно-техническим неудобством его применения. Впоследствии он был развит в [2, 7] и получил название «метода геоморфологического моделирования». В его основу положены результаты комплексного изучения прогнозирования переформирования береговой линии как системы взаимосвязанных форм рельефа подводной и надводной частей водоема. Метод геоморфологического моделирования включал три последовательные операции: поиск и изучение природного аналога – берегового склона, где наблюдаются или могут происходить абразионные процессы; нахождение определенных условий для доказательства подобия аналога объекту прогноза; перенос данных с аналога на объект прогноза [2, 7].

Методы Д.П. Финарова [2, 7] и Л.Б. Розовского [5, 6] применялись для крупных водохранилищ, где процессы берегоформирования отличаются масштабами и интенсивностью. При этом все вышеуказанные методы были основаны на учете распределения энергии волнения в береговой зоне.

Исходя из особенностей местных природных условий, при разработке критериев подобия для прогнозирования процессов переработки на водохранилищах Беларуси В.Е. Левкевичем был разработан метод натурального гидроморфологического подобия [8–11], который предлагалось применять лишь для водохранилищ руслового типа. Однако при выводе критериев подобия в работах [8–11] не был учтен ряд характеристик, которые существенны в оценке влияния хода развития и протекания процессов абразии в условиях водохранилищ, создаваемых на базе озер (преимущественно для целей гидроэнергетики). В связи с этим в период с 2004 по 2010 гг. нами были проведены детальные натурные исследования, позволившие рассмотреть и применить метод природных аналогов для водохранилищ озерного типа и водоемов, где произошли изменения в их гидрологическом режиме.

### **КРИТЕРИИ ГИДРОЛОГО-ГЕОМОРФОЛОГИЧЕСКОГО ПОДОБИЯ ПРИ ПРОГНОЗИРОВАНИИ АБРАЗИОННЫХ ПРОЦЕССОВ ВОДОХРАНИЛИЩ БЕЛАРУСИ**

Для возможности применения критериев подобия при прогнозировании абразионных процессов необходимо наличие широкого спектра геоморфологических, морфометрических и гидрологических характеристик как водохранилища, так и его разрушаемых берегов. Для этого необходимо:

1. Определить гидролого-геоморфологические условия на объекте аналоге и объекте прогнозе.
2. Уточнить основные берегоформирующие факторы и условия с учетом изменения гидрологических особенностей водоема.
3. Разработать основные критерии гидролого-геоморфологического подобия.
4. Обеспечить выполнение граничных условий прогнозирования абразионных процессов.

Остановимся на каждом из четырех перечисленных пунктов более подробно.

1. Выполнение гидролого-геоморфологических требований, необходимых для соблюдения подобия, возможно, если:

1.1. Имеются близкие значения типологического показателя подобия водохранилищ ( $K_{ТП}$ ), т.е. сравниваемые водохранилища (аналог и объект прогноза) находятся в аналогичных природных условиях (например, Поозерье, Белорусская гряда, Полесье).

1.2. В зависимости от гидродинамической группы [11], обуславливающей формирование берегового склона, генетический показатель ( $K_{ГН}$ ) или критерий однородности выборки береговых склонов должен иметь одинаковый литологический состав пород, входить в одну генетическую группу и иметь одинаковый тип берега.

1.3. Рассматриваемые водохранилища (аналог и объект прогноза) относятся к одной группе по уровенному режиму, имеют близкие средние значения глубин по длине разгона волны [12] и близкий гидрологический показатель ( $K_{ГД}$ ).

1.4. Морфометрический показатель ( $K_M$ ) берегового склона учитывает его высоту, ширину подводной части отмели, уклоны, глубину на внешнем крае отмели. Выбор определяющих показателей должен зависеть от установленного типа берега (пологий абразионный береговой склон или обрывистый).

1.5. Коэффициенты извилистости береговой линии в плане ( $K_{ИЗ}$ ) [12] и ориентация водоема имеют схожие параметры.

2. Результаты лабораторных и натурных исследований, проведенных автором, позволили установить, что возникла необходимость в дополнении и уточнение ряда берегообразующих факторов, входящих в критерии подобия, для водохранилищ как руслового, так и озерного типа. В табл. 1 приведены их показатели, используемые при

разработке метода природных аналогов, которые учитывают ранее установленные берегоформирующие факторы и условия. В работах [2, 7, 13, 14] установлено, что разрушение береговых склонов происходит при воздействии волн 1–5 %-ной обеспеченности, что соответствует более 0,4 м их высоты. При выборе прогнозируемого участка для определения высоты волны 1–5 %-ной обеспеченности необходима информация о морфометрических характеристиках водоема, направлении и скорости ветра не менее чем за десятилетний период [15]. Проведенные расчеты по [16] и сравнение результатов с натурными данными показали, что для установления высоты волны 1–5 %-ной обеспеченности скорость ветра должна превышать 8 м/с.

Таблица 1 – Показатели процесса переработки береговых склонов

| Представительные характеристики                         | Наименование фактора                   | Обозначение      |
|---|--|------------------|
| Геологические характеристики размываемых грунтов        | Средний диаметр частиц грунта          | $d_{50}$         |
|   | Коэффициент неоднородности грунта      | $\eta$           |
| Гидрологические характеристики водоема                  | Амплитуда колебания уровня воды        | $\Delta A$       |
|   | Высота волны                           | $h_{1-5\%}$      |
|   | Средняя глубина по длине разгона волны | $\overline{h_D}$ |
|   | Высота поднятия уровня воды            | $\Delta A'$      |
| Морфологические характеристики береговой линии и склона | Ширина подводной части отмели          | $B_{\text{пд}}$  |
|   | Высота берегового склона               | $H_{\text{ск}}$  |
|   | Угол наклона подводной части отмели    | $i_{\text{пд}}$  |
| Морфометрические характеристики водоема                 | Длина разгона волны                    | $D_p$            |
|   | Глубина на внешнем краю отмели         | $H_{\text{гл}}$  |

Выполнение данного требования позволит в первом приближении сравнить качественно вышеуказанные характеристики на объектах (аналоге и прогнозе).

3. Обоснование и вывод критериев гидролого-геоморфологического подобия основывался на работах [9, 11].

Изменение гидрологических условий водоема ведет к трансформации его морфометрических характеристик: площади, объема, длины, средней глубины и т.д. В связи с этим один из морфометрических критериев удобно представить в следующей форме:

$$M_{\text{кн}} = \frac{D_p + kD'_p}{\overline{h_D} + \Delta A'}, \quad (1)$$

где  $D_p$  – расчетная длина разгона волны до изменения уровенного режима, м;

$D'_p$  – расчетная длина разгона волны после изменения уровенного режима, м;

$\overline{h_D}$  – средняя глубина по длине разгона волны до изменения уровенного режима, м;

$\Delta A'$  – высота поднятия уровня воды после изменения гидрологических условий водоема, м;

$k$  – коэффициент, равный отношению площади водоема после затопления к площади до затопления.

Расчетная длина разгона волны после изменения гидрологических условий в водоеме вычисляется следующим образом:

$$D'_p = (\Delta A' + \overline{h}_D) \cdot \text{ctg } i_{\text{нд}}, \quad (2)$$

где  $i_{\text{нд}}$  – угол наклона подводной части отмели, град.

На величину линейной переработки наряду со средневзвешенным диаметром оказывает коэффициент неоднородности грунта, слагающего береговой склон [1, 13]. В пределах водохранилищ Беларуси данный показатель варьируется в пределах от 1,1 до 8. Обработка результатов натурных наблюдений по репрезентативным участкам и их сравнение с данными [1, 13] показали, что с увеличением коэффициента неоднородности грунта при одинаковых морфометрических характеристиках берегового склона масштабы переработки значительно меньше.

Поэтому при выводе одного из геоморфологических критериев подобия учитывался коэффициент неоднородности грунта:

$$M_{Kd} = \frac{H_{\text{ск}}}{d_{50}} \eta, \quad (3)$$

где  $H_{\text{ск}}$  – высота склона, м;

$d_{50}$  – средневзвешенный диаметр частиц, м;

$\eta$  – коэффициент неоднородности грунта.

Величина линейной переработки непосредственно связана с шириной подводной части отмели и глубиной на внешнем краю отмели, что подтверждают результаты натурных исследований [13]. С увеличением вышеуказанных характеристик процесс абразии постепенно стабилизировался.

Следующий геоморфологический критерий имеет вид:

$$M_{\text{KB}} = \frac{B_{\text{п}}}{H_{\text{гл}} + \Delta A'}, \quad (4)$$

где  $B_{\text{п}}$  – ширина подводной части отмели, м;

$H_{\text{гл}}$  – глубина на внешнем краю отмели, м.

Критерий гидрологического подобия имеет две модификации. В первом случае учитывались повторяемость активных уровней воды и обеспеченность максимальной высоты волны:

$$M_{\text{КА}} = \frac{P_V \cdot h_{1-5\%}}{P_A \cdot \Delta A}, \quad (5)$$

где  $P_A$  – повторяемость активных уровней, %;

$P_V$  – обеспеченность максимальной высоты волны, %;

$h_{1-5\%}$  – высота волны 1–5 %-ной обеспеченности, м;

$\Delta A$  – амплитуда колебания, м.

Во втором случае сравнение результатов лабораторных и натурных исследований показало, что характер отступления береговой линии зависит от характера изменения уровенного режима при условии, что значения геоморфологических характеристик

берегового склона одинаковы. Тогда критерий гидрологического подобия представим следующей формулой:

$$M'_{KA} = \left( \frac{h_{1-5\%}}{\Delta A} \right) b, \quad (6)$$

где  $b$  – коэффициент, зависящий от характера поднятия уровня воды, морфометрических и геологических характеристик берегового склона.

Следующий гидрологический критерий, с учетом изменения уровня воды, определяется зависимостью вида:

$$M_{KG} = \frac{\Delta A}{H_{ГЛ} + \Delta A'}. \quad (7)$$

4. Исходя из геоморфологических, морфометрических, гидрологических характеристик водохранилищ и региональных условий установлены граничные условия, при которых проводится прогноз переработки береговых склонов [9, 11]. При этом проведенные натурные исследования позволили уточнить ряд берегоформирующих факторов с учетом их применимости к водохранилищам различного типа, численные значения которых указаны в табл. 2.

Таблица 2 – Граничные условия применения гидролого-геоморфологических критериев подобия

| Группа водоема | Граничные условия применимости берегообразующих факторов и условий |                 |                 |                |          |                  |              |              |              |
|----------------|--|-----------------|-----------------|----------------|----------|------------------|--------------|--------------|--------------|
|                | $D_p$ , м  | $\bar{h}_D$ , м | $h_{1-5\%}$ , м | $\Delta A$ , м | $\eta$   | $i_{пл}$ , град. | $H_{ск}$ , м | $d_{50}$ , м | $H_{ГЛ}$ , м |
| Группа 1       | 500–5000   | 1,2–7,0         | 0,4–1,5         | 0,6–3,5        | 1,2–10,0 | 0,01–0,3         | 1,0–10,0     | 0,05–0,35    | 1,0–2,0      |
| Группа 2       | 500–5000   | 1,2–7,0         | 0,4–1,5         | 0,1–0,5        | 1,2–10,0 | 0,01–0,3         | 1,0–12,0     | 0,05–0,35    | 1,2–2,4      |

#### ПРИНЦИПЫ И ПОДХОДЫ ПО ПРОГНОЗИРОВАНИЮ АБРАЗИОННЫХ ПРОЦЕССОВ НА ОСНОВЕ МЕТОДА АНАЛОГИЙ

Прогноз деформаций методом природных аналогов необходимо выполнять в две стадии: общий и детальный.

Общий прогноз информации характеризуется изучением морфометрических характеристик водохранилища, его формы и расположения в плане по отношению к сторонам света. По данным метеостанций и водомерных постов определяются преобладающее направление ветров и обеспеченность активных уровней воды. В зависимости от направления ветра намечаются потенциально опасные участки, находящиеся с подветренной стороны, на которых с большей вероятностью будут наблюдаться процессы берегоформирования.

Вторая стадия может быть представлена в виде альбома аналогов, использование которого сводится:

1) к установлению на проектируемом и существующем водохранилище потенциально опасных участков с определением их геоморфологических, морфометрических и гидрологических характеристик.

2) поиску близких объектов аналогов (створов) из существующих схем и профилей, на которых процесс абразии стабилизировался.

3) выполнению прогноза размыва по контрольным створам с применением критериев гидролого-геоморфологического подобия.

4) проверке правильности выбора объекта аналога.

Рассмотрим указанные этапы подробнее.

1. По результатам натурных наблюдений на карте исследуемого водохранилища, где наблюдаются процессы берегоформирования, определяются участки с последующей их привязкой к местности. Результаты замера морфологических характеристик берегового склона (надводной и подводной частей отмели) можно занести в табл. 3.

Таблица 3 – Геоморфологические, морфометрические и гидрологические характеристики, входящие в состав критериев подобия

| Геоморфологические, гидрологические морфометрические характеристики             | Обозначение      | Значение |
|---|------------------|----------|
| Высота берегового склона, м   | $H_{ск}$         | 3,7      |
| Ширина подводной части отмели, м  | $B_{пд}$         | 5,9      |
| Коэффициент неоднородности грунта   | $\eta$           | 2,9      |
| Средний диаметр частиц грунта, м  | $d_{50}$         | 0,15     |
| Глубина на внешнем краю отмели, м   | $H_{гл}$         | 1,6      |
| Средняя глубина водохранилища по длине разгона, м                               | $\overline{h_D}$ | 4,3      |
| Обеспеченность активных уровней за весь период наблюдений, %                    | $P_A$            | 81       |
| Амплитуда колебания уровня воды в безледный период, м                           | $\Delta A$       | 1,13     |
| Высота поднятия уровня воды после изменения гидрологических условий водоема, м; | $\Delta A'$      | 0,5      |
| Повторяемость скоростей ветра с 1–5 %-ной обеспеченностью, %                    | $P_V$            | 0,5      |
| Длина разгона волны, м  | $D_p$            | 2,1      |
| Максимальная расчетная высота волны по длине разгона, м                         | $h_{1-5\%}$      | 0,72     |

В случае отсутствия данных или невозможности определения глубины на внешнем краю отмели ( $H_{гл}$ ) на существующих водоемах данный показатель определяется для каждой группы водоема по зависимостям [9, 11]:

– 1 группа:

$$H_{гл} = 1,865 - 0,5\Delta A + 1,34h_{25\%}, \quad (8)$$

– 2 группа:

$$H_{гл} = 0,42 - 0,627\Delta A + 0,272h_{25\%}, \quad (9)$$

где  $h_{25\%}$  – высота волны 25 %-ной обеспеченности, м.

Для проектируемых водохранилищ или в случае их строительства на базе озер величина  $H_{гл}$  принимается равной соответствующему ей значению по результатам натурных исследований в аналогичных условиях [3].

По результатам отбора и лабораторного анализа образцов грунта, взятых из откоса коренного берега, устанавливаются коэффициент неоднородности и средневзвешенный диаметр [17, 18]. Затем строится кривая гранулометрического состава с определением коэффициента неоднородности. Данные заносятся вновь в табл. 3.

Для определения расчетной высоты волны по данным ближайшей к водоему метеостанции определяется наибольшая скорость ветра (повторяемость направления одинакова для всех румбов). Длина разгона волны при простой конфигурации береговой линии водохранилища ( $D_0/D_{\pm 2} < 2$ ) принимается равной максимальному расстоянию от рассматриваемого створа сооружения до противоположного берега вне зависимости от направления сторон света. При сложной конфигурации ( $D_0/D_{\pm 2} \geq 2$ ) длина разгона волны определяется в соответствии с рекомендациями [19]. Затем по указаниям [16, 19] определяется высота волны. В случае отсутствия данных, высота волны 1–5 %-ной обеспеченности определяется по графику  $h_{1-5\%} = f(D_p)$  (рис. 1).

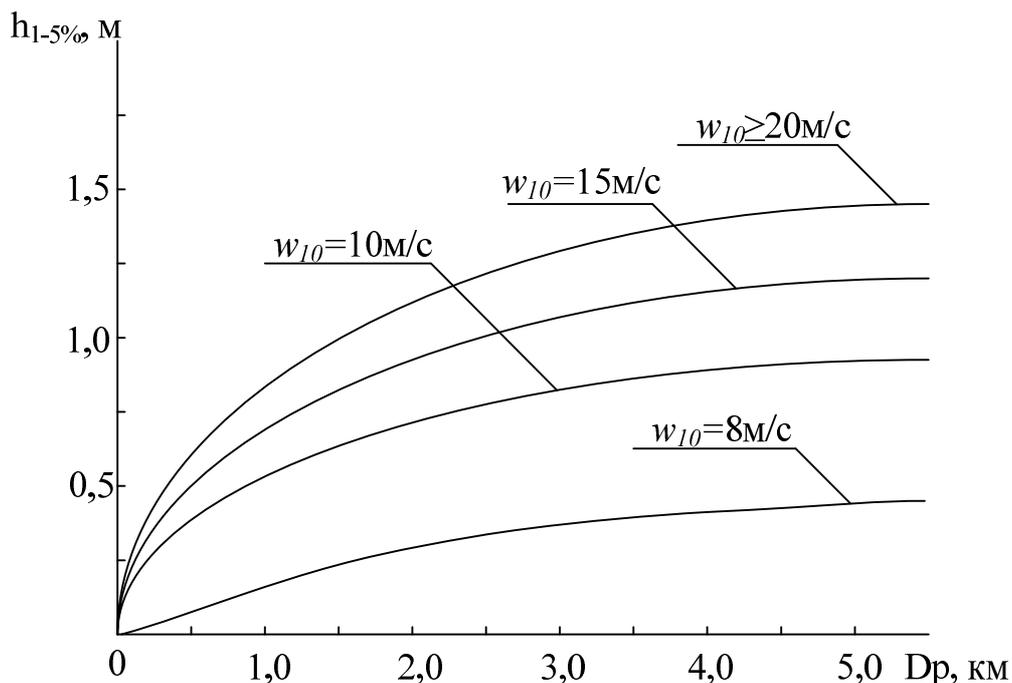


Рисунок 1 – График для определения расчетной высоты волны

2. В работах [2, 5–7] отмечено, что необходимое количество аналогов будет зависеть от интервала точности прогноза. В случае, когда требуется высокая точность, производится поиск объекта аналога, где количественные критерии подобия более точно совпадут с данными объекта прогноза. Из перечня существующих схем и профилей, на которых произошла стабилизация процессов переработки, производятся поиск и нахождение участков с указанными характеристиками. Число таких объектов будет минимальное, а их поиск будет зависеть от большого числа натуральных моделей, которых может быть более десяти единиц. Уменьшение интервала точности приведет к расширению границ автомодельных областей, которые приведут к увеличению выборки природных аналогов [2, 5–7].

3. В соответствии с установленными морфометрическими, геоморфологическими и гидрологическими характеристиками объекта прогноза и объекта аналога, входящих в критерии натурального подобия, производится прогноз размыва по контрольным створам методом природных аналогов.

В зависимости от типа водохранилища использование критериев подобия будет разграничено. Изначально для этого определяются варианты применения метода природных аналогов в условиях водных объектов различного типа [9]. Адекватность прогноза обеспечивается путем использования критериев подобия, указанных в таблице 4, и сравнения их численных значений.

Таблица 4 – Критерии гидролого-геоморфологического подобия

| Критерии подобия   | Расчетные соотношения                                     |  |
|--------------------|---|--|
|                    | Для условий водохранилищ руслового типа                   | Для условий водохранилищ озерного типа         |
| Морфометрические   | $M_{KH} = \frac{D_P}{h_D}$ [9]                            | $M_{KH} = \frac{D_P + kD'_P}{h_D + \Delta A'}$ |
| Гидрологические    | $M_{KA} = \frac{P_V \cdot h_{1-5\%}}{P_A \cdot \Delta A}$ |  |
|                    | $M'_{KA} = \left( \frac{h_{1-5\%}}{\Delta A} \right)^b$   |  |
| Гидрологические    | $M_{KG} = \frac{\Delta A}{H_{ГЛ}}$ [9]                    | $M_{KG} = \frac{\Delta A}{H_{ГЛ} + A'}$        |
| Геоморфологические | $M_{Kd} = \frac{H_{ск}}{d_{50}} \eta$                     |  |
|                    | $M_{KB} = \frac{B_{П}}{H_{ГЛ} + \Delta A'}$               |  |

Сходство в протекании абразионных процессов объекта аналога и объекта прогноза будет в случае выполнения следующих условий:

$$F_{\text{аналог}}(M_{KH}, M_{KB}, M_{KG}, M_{KA}, M'_{KA}, M_{Kd}) \in F_{\text{прогноз}}(M_{KH}, M_{KB}, M_{KG}, M_{KA}, M'_{KA}, M_{Kd}), \quad (10)$$

4. С целью проверки правильности выбора объекта аналога для объекта прогноза необходимо сравнить численные значения критериев подобия. Погрешность в соответствии с [9] не должна превышать 20 %.

#### МАКЕТ АЛЬБОМА АНАЛОГА ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ АБРАЗИОННЫХ ПРОЦЕССОВ БЕРЕГОВ ВОДОХРАНИЛИЩ

В соответствии с разработанными критериями гидролого-геоморфологического подобия для водохранилищ различного типа и по результатам проведенных ранее натурных стационарных исследований для прогноза абразионных процессов методом природных аналогов автором разрабатывается альбом природных аналогов. Примерный макет альбома природных аналогов представлен в табл. 5–7 и на рис. 2. В качестве примера был проанализирован прогноз переработки береговой линии на Заславском водохранилище протяженностью более 120 м. За аналог взят Лепельский водоем с длиной береговой линии, подверженной процессу абразии, более 150 м. Процессы переработки в настоящее время стабилизировались. В табл. 6, 7 представлены все необходимые данные для прогнозирования отступления береговой линии, а в табл. 8 – результаты переработки за период наблюдения. Морфометрические, геоморфологические и гидрологические характеристики объекта аналога соответствуют начальному периоду эксплуатации водохранилища.

Таблица 5 – Схемы водохранилищ и их расположение

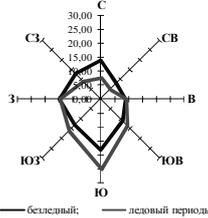
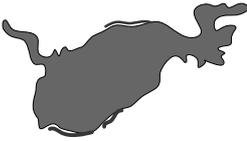
| Название водоема | Тип водоема | Группа водоема | Схема водоема   | Преобладающее направление ветров   | Длина абразионного участка, м |
|------------------|-------------|----------------|---|--|-------------------------------|
| Лепельское       | озерный     | 1              |  |  | более 150                     |
| Заславское       | руслевой    | 1              |  |  | более 120                     |

Таблица 6 – Морфометрические, геоморфологические и гидрологические характеристики объекта аналога и объекта прогноза

| Геоморфологические и морфометрические характеристики   | Обозначения      | Название водоема |                 |
|--|------------------|------------------|-----------------|
|  |                  | объект аналог    | объект прогноза |
|  |                  | Лепельское       | Заславское      |
| Высота берегового склона, м  | $H_{ск}$         | 3,6              | 3,7             |
| Ширина подводной части отмели, м   | $B_{пд}$         | 5,5              | 5,4             |
| Коэффициент неоднородности грунта  | $\eta$           | 1,9              | 2,4             |
| Средний диаметр частиц грунта, м   | $d_{50}$         | 0,0013           | 0,0015          |
| Глубина на внешнем краю отмели, м  | $H_{гл}$         | 1,8              | 1,6             |
| Средняя глубина водохранилища по длине разгона, м  | $\overline{h_D}$ | 6,3              | 4,3             |
| Амплитуда колебаний в безледный период, м  | $\Delta A$       | 1,2              | 1,13            |
| Высота поднятия уровня воды после изменения гидрологических условий водоема, м               | $\Delta A'$      | –                | 0,5             |
| Обеспеченность активных уровней за безледный период наблюдений, %                            | $P_A$            | 69               | 81              |
| Повторяемость скоростей ветра с 1-5% обеспеченностью, % по установленной длине разгона волны | $P_V$            | 0,6              | 0,5             |
| Длина разгона волны, м   | $D_p$            | 2600             | 2100            |
| Максимальная расчетная высота волны по установленной длине разгона, м                        | $h_{1-5\%}$      | 0,7              | 0,72            |

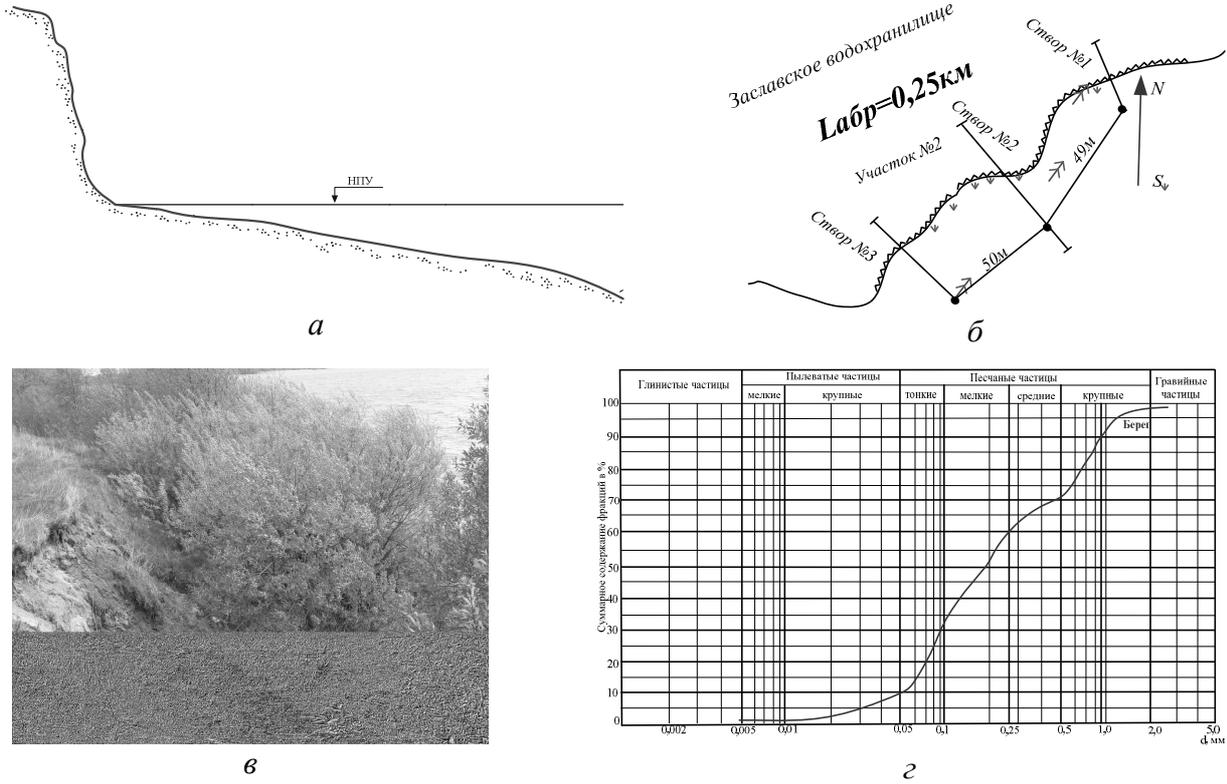
Таблица 7 – Критерии гидролого-геоморфологического подобия объекта аналога и объекта прогноза

| Критерии подобия  | Вариант идентификатора   | Название водоема   |                    | Погрешность, % |
|---|--|--------------------|--------------------|----------------|
|   |  | объект аналог      | объект прогноза    |                |
|   |  | Лепельское         | Заславское         |                |
|   |  | Численное значение |                    |                |
| Морфометрические  |  |                    |                    | 6              |
| $M_{KH} = \frac{D_P}{h_D}, [9]$                         |  | 413                | –                  |                |
| $M_{KH} = \frac{D_P + kD'_P}{h_D + \Delta A'}$          |  | –                  | 438                |                |
| Гидрологические   | Водохранилище руслового типа озеровидное в плане – водохранилище озерного типа |                    |                    | 18             |
| $M_{KA} = \frac{P_V h_{1-5\%}}{P_A \cdot \Delta A}$     |  | 0,005              | 0,0041             |                |
| $M'_{KA} = \left( \frac{h_{1-5\%}}{\Delta A} \right) b$ |  | –                  | –                  | –              |
| $M_{KG} = \frac{\Delta A}{H_{ГЛ} + \Delta A'}$          | $O_o - O_R$  | 0,67               | 0,55               | 19             |
| Геоморфологические                                      |  |                    |                    |                |
| $M_{kd} = \frac{H_{ck}}{d_{50}} \eta$                   |  | $5,26 \times 10^3$ | $5,92 \times 10^3$ | 13             |
| $M_{KB} = \frac{B_{\Pi}}{H_{ГЛ} + \Delta A'}$           |  | 3,1                | 2,6                | 16             |

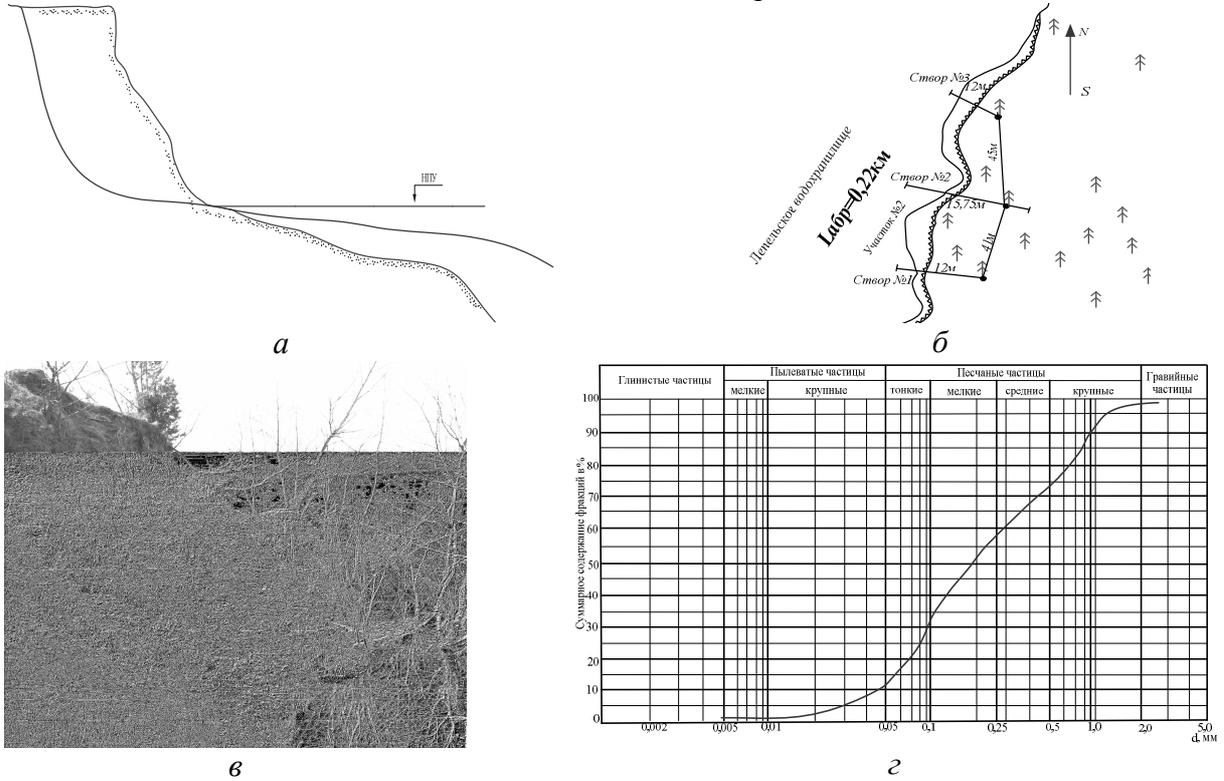
Таблица 8 – Прогнозные показатели линейной переработки

| Номер участка/ створа | Время стабилизации процесса, лет | Линейная переработка, м |
|-----------------------|----------------------------------|-------------------------|
| Объект аналог         |                                  |                         |
| 1/1,2                 | 15                               | 3,5                     |
| Объект прогноза       |                                  |                         |
| 1/1–3                 | 15                               | $3,5 \pm 0,7$           |

Объект прогноза (Заславское водохранилище)



Объект аналог (Лепельское водохранилище)



*a* – профиль склона; *б* – схема участка; *в* – фотография склона;  
*г* – кривая гранулометрического состава грунта

Рисунок 2 – Примерный макет альбома аналога

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании вышеизложенного материала можно сделать следующие выводы:

1. В результате анализа существующих фондовых материалов и результатов обработки натуральных исследований разработаны и предложены критерии гидролого-геоморфологического подобия для прогнозирования процесса деформации естественных береговых склонов на водных объектах на основе метода пригодных аналогов.
2. Разработаны методические подходы к определению критериев подобия.
3. Предложена структура альбома природных аналогов, необходимых для экспресс-прогноза переработки коренных берегов водохранилищ, а также деформации откосов дамб и плотин.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Пышкин, Б.П. Динамика берегов водохранилищ / Б.П. Пышкин. – Киев : Наукова думка, 1973. – 414 с.
2. Финаров, Д.П. Динамика берегов и котловин водохранилищ гидроэлектростанций СССР / Д.П. Финаров. – Л. : Энергия, 1974. – 244 с.
3. Гречищев, Е.К. Метод расчета ширины зоны размыва берегов на примере Братского водохранилища / Е.К. Гречищев. – Иркутск : Иркутское книжное издательство, 1961. – 95 с.
4. Методические рекомендации по прогнозированию переформирования берегов водохранилищ. – Л. : ВНИИГ, 1975. – 65 с.
5. Розовский, Л.Б. Введение в теорию геологического подобия и натурального моделирования / Л.Б. Розовский. – М. : Недра, 1969. – 128 с.
6. Розовский, Л.Б. Инженерно-геологические прогнозы и моделирование / Л.Б. Розовский, И.П. Зелинский. – Одесса : ОГУ, 1975. – 115 с.
7. Финаров, Д.П. Геоморфологический анализ и прогнозирование переформирования береговой зоны и дна водохранилищ / Д.П. Финаров. – Л. : Наука, 1986. – 228 с.
8. Левкевич, В.Е. Рациональное использование и охрана прибрежных ландшафтов на водохранилищах Беларуси / В.Е. Левкевич, П.С. Лопух. – Минск : БелНИИТИ, 1990. – 60 с.
9. Широков, В.М. Методические рекомендации по оценке воздействий малых водохранилищ на окружающую среду / В.М. Широков, П.С. Лопух, В.Е. Левкевич ; под ред. В.М. Широкова. – Минск : Белгосуниверситет, 1995. – 68 с.
10. Левкевич, В.Е. Методические рекомендации по расчету незакрепленных верховых откосов дамб и плотин на малых водохранилищах и прудах мелиоративного назначения / В.Е. Левкевич. – Минск : ЦНИИКИВР, 1989 – 36 с.
11. Широков, В.М. Формирование берегов малых водохранилищ лесной зоны / В.М. Широков, П.С. Лопух, В.Е. Левкевич. – С.-Пб. : Гидрометеиздат, 1992 – 160 с.
12. Левкевич, В.Е. Рекомендации по прогнозированию переработки абразионных берегов малых равнинных водохранилищ, сложенных несвязанными грунтами / В.Е. Левкевич. – Минск : ЦНИИКИВР, 1986. – 39 с.
13. Левкевич, В.Е. Переработка берегов малых равнинных водохранилищ мелиоративных систем, ее прогноз и управления (на примере Белорусской ССР) : дис. ... канд. техн. наук : 06.01.02 / В.Е. Левкевич. – Минск, 1986. – 135 с.
14. Природные и социально-экономические условия Белорусской ССР: научные сообщения по программе XXV Международного географического конгресса / под общ. ред. Н.Т. Романовского, В.М. Широкова. – Минск, 1984. – 118 с.
15. Справочник по климату Беларуси. Ч.4 Ветер. Атмосферное давление / М.А. Гольберг [и др.] ; под общ. ред. М.А. Гольберга. – Минск : БЕЛНИЦ ЭКОЛОГИЯ, 2003. – 124 с.
16. Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов): СНиП 2.06.04-82\*. – Введ. 15.06.82. – М. : Госстрой, 1982. – 40 с.
17. Грунты. Отбор, упаковка, транспортирование и хранение образцов : ГОСТ 12071-2000. – Введ. 01.06.2002. – Минск : Межгос. науч.-тех. комиссия по стандартизации, техническому нормированию и сертификации в строительстве, 2002 – 13с.
18. Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава : ГОСТ 12536-79. – Введ. 01.07.80. – М. : Госстандарт СССР, 1980 – 25 с.
19. Левкевич, Е.М. Проектирование поперечного профиля земляных плотин и напорных дамб с уположенными и пологими верховыми откосами / Е.М. Левкевич. – Минск : БГПА, 1994. – 30 с.