

Алгоритм численных расчетов для модели переформирования берега внутреннего водоема

В.В. Журавлева¹, И.А. Ефремов¹, К.В. Марусин²

¹Алтайский государственный университет (Барнаул, Россия)

²Институт водно-экологических проблем СО РАН (Барнаул, Россия)

Numerical Calculation Algorithm for the Model of a Reservoir Bank Transformation

V.V. Zhuravleva¹, I.A. Efremov¹, K.V. Marusin²

¹Altai State University (Barnaul, Russia)

²Institute for Water and Environmental Problems SB RAS
(Barnaul, Russia)

Актуальность исследования заключается в том, что разработанный численный алгоритм и комплекс моделирования процессов переформирования берега внутреннего водоема помогут понять, какой промежуток времени понадобится для того, чтобы отступление берега вглубь достигло заданного расстояния. Объектом исследования является модель Качугина, описывающая процессы переформирования берегов водохранилищ. Метод базируется на большом экспериментальном материале и признан наиболее достоверным. Авторами разработан численный алгоритм для модификации указанного метода, позволяющий получить прогнозный профиль берега внутреннего водоема на заданный срок. Учитывая достаточно большое количество параметров и факторов, влияющих на рассматриваемые процессы, следует отметить, что использование разработанного авторами комплекса моделирования не потребует высоких затрат на получение данных и вычисление прогнозов.

В исследовании решены следующие задачи: изучены процессы и модели процессов переформирования берегов внутренних водоемов; предложена алгоритмическая модификация численных расчетов по методу Качугина; разработан программный комплекс моделирования; проведены тестирование и верификация программного комплекса.

Ключевые слова: водохранилище, разрушение берега, методы прогнозирования, комплекс численных расчетов, метод Качугина.

DOI 10.14258/izvasu(2020)1-14

Введение. Выбор альтернативных методов снижения рисков потери земель в береговой зоне внутренних водоемов зависит от своевременного достоверного прогноза переформирования берегов.

The relevance of the study lies in the fact that the developed numerical algorithm and the complex of simulation of reservoir bank transformation processes will help to understand what period of time will be needed for the retreat of the bank line inland to reach a given distance. The object of research is the Kachugin model that describes the reservoir bank transformation processes. The method is based on large experimental material and is recognized as the most reliable. The authors propose a developed numerical algorithm to modify this method and obtain the predicted profile of the reservoir bank line for a given period. It should be noted that usage of the simulation complex developed by the authors does not require high costs for obtaining data and calculating forecasts while considering a fairly large number of parameters and factors affecting the processes.

The following tasks are solved in the study: the processes and models of the reservoir bank transformation processes are studied; an algorithmic modification of numerical calculations by the Kachugin method is proposed; a software package for simulation is developed; testing and verification of the developed software package is conducted.

Key words: reservoir, bank line destruction, forecasting methods, complex of numerical calculations, Kachugin's method.

Наиболее приемлемым для современной практики является вариантный прогноз. Главная задача, которую ставит практика в направлении количественной оценки берегопереформирований на водохранили-

щих, — определение скорости отступления надводного берегового обрыва и величины отступления на заданный срок [1–2].

Формирование берегов водохранилищ после их наполнения принято называть переработкой, так как до их создания берега формировались под воздействием природных процессов в иных, естественных, условиях. После наполнения водохранилищ эти условия резко изменяются. Разрушается вновь созданная линия берега под влиянием главным образом подмыва, нарушается устойчивость склонов, активизируются экзогенные геологические процессы, продукты разрушения пород аккумулируются в ложе водохранилищ, изменяются гидрогеологические условия. Основные факторы, влияющие на характер и интенсивность процесса переформирования берегов внутренних водоемов, объединяют в группы: метеорологические (сила, направление ветра и продолжительность действия); гидрологические (волновые процессы, глубина и размеры водохранилища, колебания уровня воды и т.д.); геоморфологические (рельеф подводного берегового склона и побережья; размеры, высота, крутизна, генетические типы, состояние, включая характер поверхности склонов) и прочие [1–2].

Модели процессов переформирования берегов. Многочисленные исследования отечественных и зарубежных ученых в области моделирования процессов переформирования берегов внутренних водоемов и прогнозирования их состояний привели к выделению трех основных групп методов [1–6]:

1. Энергетические методы (Е.Г. Качугин, Н.Е. Кондратьев и др.). Заключаются в сравнении суммарной энергии волнения с показателями прочности размываемых горных пород. Эти методы наиболее применимы при прогнозе абразионного развития берегов, сложенных дисперсными породами. Для высоких склонов, в строении которых участвуют скальные и полускальные грунты, расчеты абразии по этому методу менее надежны.

2. Методы аналогий или геологического подобия (основаны на качественном, описательном, экспертном или количественном сопоставлении «эталонного» и оцениваемого объектов): прямых аналогий; натуральных моделей (Л.Б. Розовский); косвенных аналогий (Г.С. Золотарев, Е.К. Гречищев и др.).

3. Методы обобщенных переменных (В.М. Воскобойников, О.Г. Лиходедова).

Универсальный метод Качугина, который выбран для построения прогнозного профиля берега, основан на очевидных физических и геоморфологических закономерностях, сформулированных как положения [7]:

— в переработке берега участвуют волны всех высот, и общий объем размытых пород пропорционален суммарной энергии волн на данном участке;

— интенсивность процесса переработки зависит от сопротивления пород размыву и высоты берега;

— процесс переработки имеет затухающий характер и характеризуется кривой параболического вида.

Для построения прогнозного профиля берега необходимо определить размеры зоны размыва, которые зависят от амплитуды колебания уровней воды водохранилища. Подробное описание приведено в работах [8–9]. Возможно решение обратной задачи — определение времени переработки берега при заданном объеме размытых пород.

В работе [10] метод Качугина модифицирован в инженерную двумерную модель переформирования абразионного берега, поставленную на ЭВМ с целью выполнения вариантных постворовых прогнозов. Модель имитирует процессы размыва и аккумуляции грунта в прибрежной зоне и решает задачу нахождения прогнозного профиля берега на заданный срок или до затухания абразии.

Порядок расчета процесса переформирования берега для одного створа. На основе модификации метода Качугина был разработан численный алгоритм определения величины отступления бровки берега внутреннего водоема на заданный срок или же до момента достижения устойчивого состояния. Опишем порядок расчета.

На первом этапе определяются ветровые характеристики и затем среднегодовая энергия волнения E , кДж/м.п. [8–9]:

$$E = 33 \cdot 10^4 \cdot \sum_i \sum_j \bar{h}_i^2 \cdot \bar{\tau}_i \cdot t_{ij} \cdot \cos \varphi_j, \quad (1)$$

где \bar{h}_i^2 и $\bar{\tau}_i$ — средняя высота, м, и период волн, с, при действии ветра скоростью v_p , определяются по формулам Ю.М. Крылова [11]; φ_j — наименьший угол между нормалью к берегу и волнообразующим направлением j -ого румба; $t_{ij} = p_{ij} T / 100$ — время действия ветра скоростью v_i с направлением j -ого румба, сут.; p_{ij} — повторяемость действия ветра скоростью v_i в направлении j -ого румба, в процентах от продолжительности безледного сезона; T — среднегодовая продолжительность безледного сезона, сут.

Вторым этапом определяется высота рабочей волны равной $h_p = 0,7h_{cp}$, где h_{cp} — среднее значение высот волн обеспеченностью 0.1 % в системе на каждом волнообразующем направлении с максимальной энергией, м.

В ходе третьего этапа определяются координаты верхнего и нижнего пределов размывающего действия волн [7]:

$$z_b = z_{yb} + h_p / 3, \quad z_n = z_{yb96\%} - h_p, \quad (2)$$

Затем определяются точки пересечения верхнего и нижнего пределов размыва с поверхностью берега в начальный момент ($x_b(t=0)$, z_b) и ($x_n(t=0)$, z_n).

На *четвертом этапе* производится смещение уреза воды при ВПР $x_b(t), z_b$ по горизонтали вглубь берега относительно предыдущего положения на шаг Δx . Рассчитываются координаты бровки берегового обрыва $x_{bo}(t), z_{bo}(t)$. Для этого требуется найти (упорядоченным перебором) отрезок профиля берега с концами в точках $A(x_p, z_p)$ и $C(x_{i+1}, z_{i+1})$, для которого вертикальная проекция смещенной точки $(x_b(0) + \Delta x, z_b)$ попадает в указанный отрезок:

$$x_i \leq x_b(0) + \Delta x \leq x_{i+1}. \quad (3)$$

Фиксируем соответствующее найденной точке значение параметра

$$\alpha_0 = \frac{x_b(0) + \Delta x - x_{i+1}}{x_i - x_{i+1}}. \quad (4)$$

На *пятом этапе* в цикле перебираются значения параметра α от α_0 до 1 с малым шагом. Для каждого значения параметра ищем

$$x_m = (1 - \alpha)x_{i+1} + \alpha x_p, \quad z_m = (1 - \alpha)z_{i+1} + \alpha z_p. \quad (5)$$

При этом точка $M(x_m, z_m)$ смещается по отрезку AC от начального положения. По ходу вычислений проверяются два условия: если $\frac{z_m - z_b}{x_b - x_m} \leq L_{obr}$, то искомое

положение достигнуто и $x_{co}(t) = x_m, z_{co}(t) = z_m$; если теку-

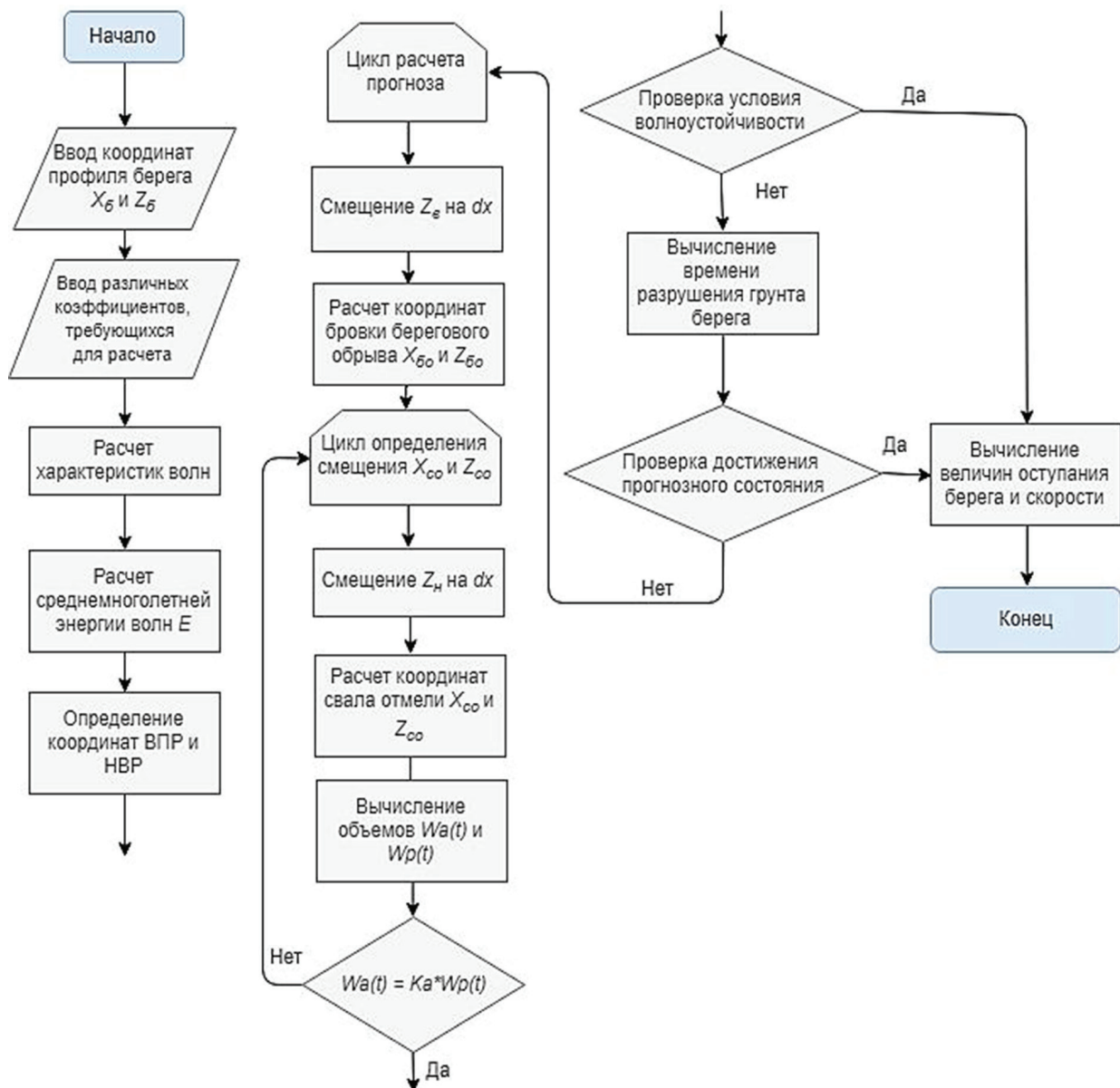


Рис. 1. Структурная схема алгоритма построения прогнозного профиля берега на заданный срок

щее значение параметра $\alpha \geq 0$, то переносим точку М на следующий отрезок профиля берега и полагаем $\alpha_0 = 0$.

На *шестом этапе* проверяется выполнение баланса объемов разрушенного $W_a(t)$ и аккумулярованного $W_p(t)$ в отмели грунта берега [10]

$$W_a(t) = K_a W_p(t). \quad (6)$$

Указанные объемы по расчетной схеме определяются с помощью численных методов поиска площади произвольного многоугольника, замкнутого ломаной линией без самопересечений, заданной своими вершинами в порядке обхода.

В случае невыполнения условия (6) задается новое положение пределов склона берега ($x_{co}(t)$ смещается на шаг Δx_b сторону акватории), и возвращаемся к четвертому этапу.

На *седьмом этапе* проверяются условия завершения основного цикла расчета: образование волноустойчивой по уклону отмели или достижение заданного срока прогноза $t_{пр}$, годы.

Волноустойчивое состояние берега соответствует условию $L_{отм}(t) \leq L_{отм.пр.}$, где уклон волноустойчивой отмели $L_{отм.пр.}$ назначается по аналогам или задается специалистом.

Достижение прогнозного состояния берега оценивается условием $t_{пр} \leq t$, где t — время разрушения берега, определяемое формулой Качугина [7]:

$$t = \sqrt[b]{\frac{W_p(t)}{EK_p K_\sigma}}. \quad (7)$$

Если оба условия, проверяемые на седьмом этапе, не выполняются, то пересчет всех координат, начиная с четвертого этапа, повторяется.

На *последнем этапе* определяются величина отступления бровки обрыва от первоначального профиля и скорость отступления за прогнозный период:

$$L(t) = z_b(0) - z_{60}(t), V(t) = L(t)/t. \quad (8)$$

Структурная схема алгоритма построения прогнозного профиля берега на заданный срок представлена на рисунке 1.

Данные и параметры, требующиеся для расчета прогнозного профиля берега:

- Координаты поверхности берега: x_{6k} — расстояние от измерительной вешки и z_{6k} — высота берега над уровнем моря, м.
- Повторяемости скоростей ветра за безледный сезон для наветренных румбов p_{ij} , определяющиеся по данным ближайшей к исследуемому берегу метеостанции (i — номер измерения, j — номер румба).
- Коэффициент размываемости пород K_p , м³/кДж.
- Коэффициент, учитывающий высоту берега, — K_σ .
- Коэффициент аккумуляции K_a .
- Уклоны берегового обрыва и свала отмели $L_{обр}$ и $L_{свл}$.
- Крупность наносов в отмели d , м.
- Уровни воды обеспеченностью 2 и 96% — $z_{ув2\%}$, $z_{ув96\%}$.
- t — время, на которое выполняется прогноз, г.

Разработка комплекса моделирования и верификация результатов выполнения расчетов. Для реализации комплекса моделирования использован стек современных WEB-технологий. Комплекс работает в online-режиме, это нужно для того, чтобы можно было получить к нему быстрый доступ, а также использовать серверные вычислительные мощности.

Клиентская часть комплекса моделирования реализована с помощью HTML5, CSS3 и JavaScript. Верстка проекта написана с помощью frontend-

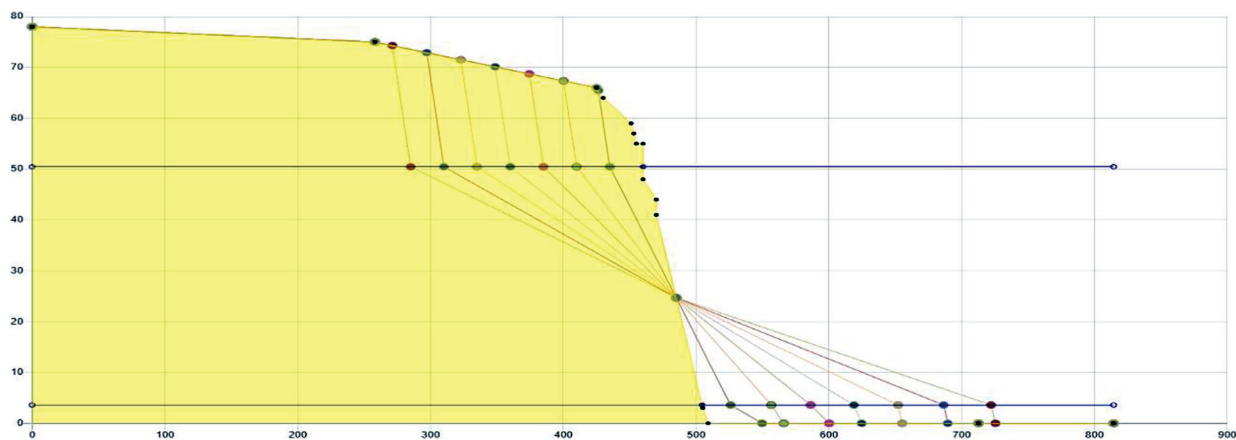


Рис. 2. Визуализация работы комплекса моделирования для расчета отступления бровки берега на участке Красноярского водохранилища

КМПБВ

[Главная](#)
[Инструкция](#)
[Калькулятор](#)
[Выход \(efremov\)](#)

[Главная](#) / [Расчет характеристик](#)

Параметры профиля

<p>Координаты профиля берега(x, z), м</p> <input type="text" value="0,78"/> <input type="text" value="258,75"/> <input type="text" value="425,66"/> <input type="text" value="430,64"/> <input type="text" value="451,59"/> <input type="text" value="453,57"/> <input type="text" value="455,55"/> <input type="text" value="460,55"/> <input type="text" value="460,48"/>	<p>Отрезок времени, на который выполняется прогноз, годы</p> <input type="text" value="10"/> <p>Уровень воды обеспеченность 2%, м</p> <input type="text" value="50"/> <p>Уровень воды обеспеченность 96%, м</p> <input type="text" value="5"/> <p>Коэффициент размываемости м³/кДж</p> <input type="text" value="0,011"/> <p>Коэффициент аккумуляции</p> <input type="text" value="0,56"/> <p>Средняя высота берега, м</p> <input type="text" value="20"/>
--	--

Загрузка

Действия

Рис. 3. Интерфейс комплекса моделирования процессов переформирования берега внутреннего водоема. Окно ввода данных для расчета

фреймворка с открытым исходным кодом BootstrapFramework [12], который позволяет создавать адаптивные интерфейсы различной вложенности и содержит в себе достаточно широкий набор библиотек. Также используется препроцессор CSS: Sass [13], позволяющий достаточно сильно расширить возможности и гибкость языка CSS с помощью введения широкого функционала: добавление переменных, вложенность стилей и т. д.

Серверная часть комплекса моделирования написана на PHP7 (это скриптовый язык общего назначения), так как на данный момент он обладает отличной производительностью и адекватным потреблением памяти, что позволяет производить расчеты с высокой скоростью.

Для тестирования комплекса моделирования был взят участок левого берега Красноярского водохранилища у п. Куртак [8]. Именно здесь берег демонстрирует максимальную интенсивность разрушения. На указанном участке с момента создания водохранилища выполнялись регулярные наблюдения за отступанием бровки берега, изменениями его профиля и т. д.

Суть приемочного тестирования заключалась в общей проверке работоспособности комплекса, а также расчете величины отступления бровки берега по описанному выше численному алгоритму и сравнении результатов с реальными данными, которые

были получены с 1971 по 1981 гг. Отклонение расчетных величин отступления берега от фактических составило 3–5 %.

Визуализация построения модельного профиля берега для третьего створа Красноярского водохранилища на участке у п. Куртак представлена на рисунке 2. Интерфейс комплекса моделирования процессов переформирования берега внутреннего водоема показан на рисунке 3.

Заключение. Разработанный программный комплекс моделирования процессов переформирования берега внутреннего водоема основан на численном алгоритме, представляющем модификацию универсального метода Качугина. Проведенное тестирование и верификация программного комплекса показывают работоспособность и высокую точность численного алгоритма.

Учитывая достаточно большое количество параметров и факторов, влияющих на рассматриваемые процессы, следует отметить, что использование разработанного комплекса моделирования не потребует высоких затрат на получение данных и вычисление многовариантных прогнозов. Дальнейшая работа будет направлена на построение адекватных сценариев ветрового режима и многовариантные расчеты, учитывающие разнообразную форму берегового обрыва.

Библиографический список

1. Хабидов А.Ш., Леонтьев И.О., Марусин К.В., Шлычков В.А., Савкин В.М., Кусковский В.С. Управление состоянием берегов водохранилищ. Новосибирск, 2009.
2. Леонтьев И.О. Прибрежная динамика: волны, течения, потоки наносов. М., 2001.
3. Иконников Л.Б. Прогноз разрушения берегов при повышении уровня Чебоксарского водохранилища // Гидротехническое строительство. М., 1990.
4. Кондратьев Н.Е. Расчеты береговых переформирований на водохранилищах. Л., 1960.
5. O'Connor B.A., Nicholson J. Modeling short-term beach profile changes // 5th Int. Conf. on Coastal and Port Eng. in developing countries. Cape Town, 1999.
6. Van Rijn L.C., Wijnberg K.M. One-dimensional modeling of individual waves and wave-induced longshore currents in the surf zone // Coastal Eng. 1996. DOI: 10.1016/0378-3839(96)00014-2.
7. Качугин Е.Г. Геологическое изучение динамики берегов водохранилищ. М., 1975.
8. Марусин К.В., Журавлева В.В., Грищенко Д.В. Методы прогнозирования переработки побережья водохранилищ // Ломоносовские чтения на Алтае: фундаментальные проблемы науки и образования : сб. научных ст. междунар. конф. Барнаул, 2014.
9. Грищенко Д.В., Ефремов И.А. Применение метода Качугина для прогнозирования переработки побережья водохранилищ // Ломоносовские чтения на Алтае: фундаментальные проблемы науки и образования : сб. научных ст. междунар. конф. Барнаул, 2015.
10. Соболев И.С., Хохлов Д.Н. Модификация метода Е.Г. Качугина для вариантного компьютерного прогноза переформирования абразионных берегов эксплуатируемых равнинных водохранилищ // Вестник МГСУ. 2012. DOI: 10.22227/1997-0935.2012.10.281-288.
11. Крылов Ю.М., Стрекалов С.С., Цыплухин В.Ф. Ветровые волны и их воздействие на сооружения. Л., 1976.
12. Официальный сайт Bootstrap. URL: <http://getbootstrap.com/> (дата обращения: 05.02.2019).
13. Официальный сайт Sass. URL: <http://sass-lang.com/> (дата обращения: 05.02.2019).