

Тогда:

$$\begin{aligned}
 P(0,86 < f < 0,88) &= \int P(f)df = \\
 &= \frac{1}{2} \left[\Phi_1 \left(\frac{b - K_{cp}}{S} \right) - \Phi_2 \left(\frac{a - K_{cp}}{S} \right) \right] = \\
 &= \frac{1}{2} [-0,7457 - 0,4313] = \\
 &= \frac{-0,3327}{2} = 0,166 \cdot 100 \rightarrow 16,6\%; \\
 \frac{b - K_{cp}}{S} &= \frac{0,88 - 0,9}{0,035} = \\
 &= \frac{-0,02}{0,035} = -0,57 \rightarrow \Phi_1 \rightarrow -0,7457; \\
 \frac{a - K_{cp}}{S} &= \frac{0,88 - 0,9}{0,035} = \\
 &= \frac{-0,02}{0,035} = -0,57 \rightarrow \Phi_2 \rightarrow -0,4313,
 \end{aligned}$$

где a, b – граничные значения коэффициента уплотнения грунта

Выводы

Вероятность того, что коэффициент уплотнения K_{com} в последующий период лежит в интервале $0,86 < K_1 < 0,88$, равна 16,6 %. Аналогичным образом, имея

динамику изменения значений коэффициентов, можно определить вероятность попадания в заданный интервал каждого в отдельности или установить динамику изменения показателя эксплуатационной надежности плотины.

1. Гнеденко Б. В., Беляев Ю. К., Соловьев А. Д. Математические методы в теории надежности. – М.: Наука, 1965.

2. Кобзарь А. И. Прикладная математическая статистика. – М.: Физматлит, 2006. – 816 с.

3. Статистический анализ данных, моделирование и исследование вероятностных закономерностей. Компьютерный подход: монография / Б. Ю. Лемешко [и др.] – Новосибирск, 2011. – 887 с.

Материал поступил в редакцию 5.12.12.

Жарницкий Валерий Яковлевич, доктор технических наук, профессор кафедры «Экспертиза и управление недвижимостью» Тел. 8-905-720-30-72

E-mail: zharnitskiy@mail.ru

Андреев Евгений Владимирович, аспирант

Тел. 8-926-264-43-07

УДК 502/504:627.8

И. С. РУМЯНЦЕВ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный университет природообустройства»

И. С. СОБОЛЬ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет»

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПЕРЕФОРМИРОВАНИЯ ТЕРМОАБРАЗИОННЫХ БЕРЕГОВ ВОДОХРАНИЛИЩ КРИОЛИТОЗОНЫ В СТАЦИОНАРНЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

Описана история вопроса, представлены численно-аналитический и адаптивный методы прогноза термоабразии, показана их совместная реализация на примере берега проектируемого Амгуэмского водохранилища.

Криолитозона, водохранилище, берег, термоабразия, прогнозирование.

There is described a history of the question, numerical – analytical and adaptive methods of thermo-abrasion forecasting are given, their joint realization is shown by the example of the bank of the Amguemsky reservoir which is under design.

Cryolite zone, water reservoir, bank, thermo-abrasion, forecasting.

На Северо-Востоке России в зоне сплошной вечной мерзлоты в постоянной эксплуатации находятся водохранилища Вилуйской (с 1967 года), Усть-Хантайской (с 1973 года), Курейской (с 1987 года), Колымской (с 1988 года), Светлинской (с 2009 года) гидроэлектростанций, строятся Усть-Среднеканская, проектируются Амгуэмская, Эвенкийская, Тельмамская, Нижнекурейская, Мокская, Канкунская и другие ГЭС с водохранилищами. Наиболее активному переформированию подвержены термоабразионные берега водохранилищ, разрушающиеся под совместным воздействием тепловой и механической (волновой) энергии воды.

Прогнозирование переформирования таких берегов актуально как при проектировании водохранилищ, так и на всем протяжении их жизненного цикла в силу неограниченности берегового процесса во времени [1].

Исследование и попытки прогнозирования переформирования мерзлых берегов водохранилищ начаты в нашей стране с 1970-х годов. Этими вопросами занимались С. В. Томирдиаро, Д. П. Финаров, Ю. Л. Шур, В. М. Гуревич, А. И. Ермолаев, Ф. Э. Арэ, Е. С. Гоголев, А. А. Каган, Н. Ф. Кривоногова и др. Не подлежит сомнению, что достижения пионеров моделирования и прогноза развития берегов водоемов криолитозоны являются значительными, но задачу количественного описания динамики термоабразионных берегов водохранилищ нельзя считать ими решенной.

Сегодня, в обстоятельствах относительной недоступности, высокой стоимости экспедиционных работ и стационарных наблюдений на водохранилищах криолитозоны, математическое моделирование остается наиболее эффективным и малозатратным способом оценки и контроля активности береговых процессов и их последствий.

Переформирование термоабразионных берегов водохранилищ – процесс многофакторный, причем часть факторов (волнение, уровень воды, мерзлотно-геологическое строение берега, температурные условия) обнаруживает стохастическую природу, что следует иметь в виду при моделировании. Известно, что любая модель является приближенной. Ее улучшение сводится обычно к учету все

новых, ранее не учитывавшихся факторов. Увеличение же числа учитываемых факторов с некоторого момента начинает снижать точность прогноза. Поэтому роль сложных моделей более значима для понимания физической сущности процесса, а практическое прогнозирование целесообразно основывать на моделях простых, с небольшим количеством факторов. Характерной чертой рассматриваемого процесса является недостаточность и неточность исходной информации на уровне моделирования. А именно ошибки в исходных данных служат основной причиной погрешностей теоретических прогнозов. Из-за этого обстоятельства целесообразно использовать несложные модели с небольшим количеством исходной информации, анализу которой следует уделять значительное внимание.

Начиная с 1990-х годов практические шаги по формализации, математическому описанию, разработке инженерных моделей переформирования берегов водохранилищ, сложенных вечномерзлыми породами, сделаны в Нижегородском государственном архитектурно-строительном университете [2]:

составлена численно-аналитическая модель термоабразии для автоматизированных многовариантных расчетов переформирования берегов водохранилищ, проектируемых и находящихся в эксплуатации [3, 4];

дано теоретическое обоснование адаптивного метода экстраполяции данных наблюдений и прогнозирования характеристик термоабразии берегов эксплуатируемых водохранилищ с учетом множества экспертных заключений в виде гипотетических трендов динамики процесса [5].

Применительно к задачам математического моделирования для оценки степени сходства оригинала и модели наиболее подходящим понятием является адекватность. Очевидно, что адекватность прогнозной модели берегопереформирования самому процессу может быть оценена только эмпирически. Для названных методов она подтверждена хорошей сходимостью расчетных данных с результатами долготлетних наблюдений за термоабразионными берегами Вилуйского водохранилища [6].

Исследование берегопереформирова-

ний в общем случае сводится к построению профилей берега по режимным створам. Структура модели имеет вид $y = f(t)$, где y – вектор характеристик процесса (отступление бровки берега, объем размывтой породы, ширина береговой отмели, уклон отмели и т. д.); t – время; f – некоторая функция. Наиболее информативной в практических целях является величина отступления со временем бровки надводного берегового обрыва. В статье дан прогноз динамики этой величины при совместной реализации численно-аналити-

ческой и адаптивной моделей берегопереформирования на примере водохранилища Амгуэмской ГЭС, проектировавшейся ОАО «Ленгидропроект» на Чукотке в зоне сплошной вечной мерзлоты [3–5].

Река Амгуэма выше створа гидроузла образует излучину, огибая так называемый перешеек, возникший в результате деятельности ледника, перегородившего древнее русло. Этот перешеек является продолжением правобережного примыкания плотины и входит в состав напорного фронта. План перешейка показан на рис. 1.

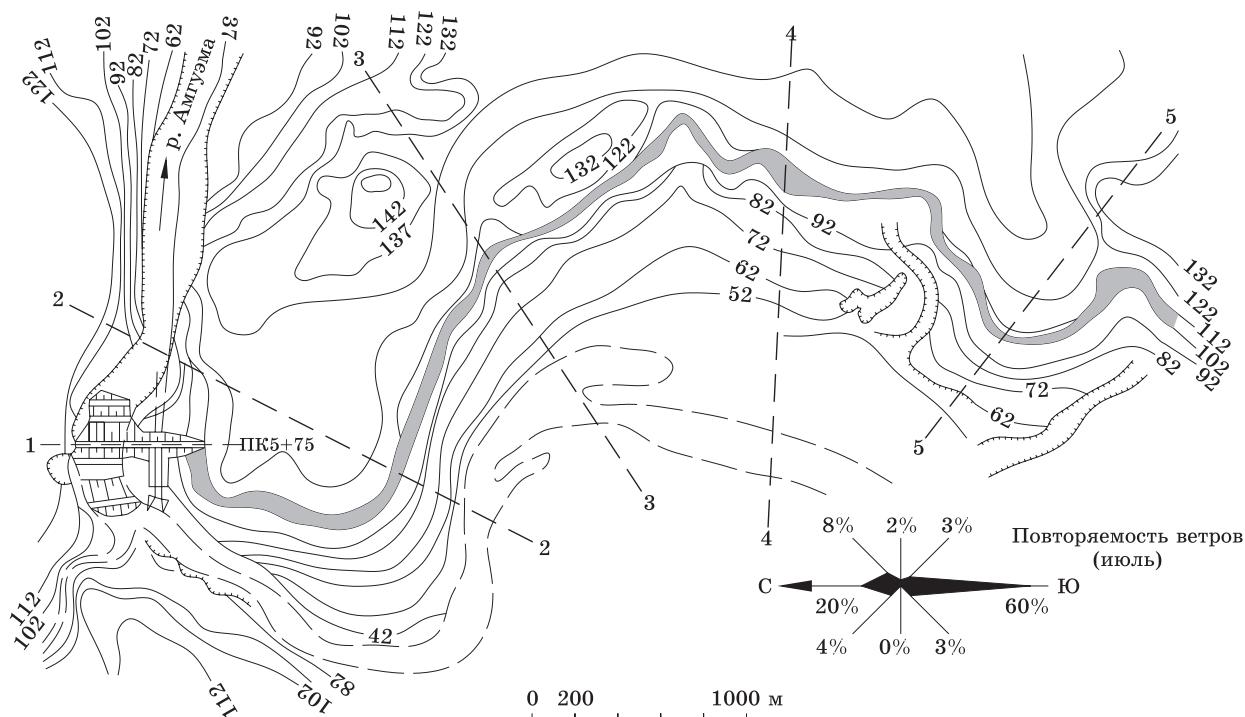


Рис. 1. План правого берега Амгуэмского водохранилища в районе перешейка (отметки даны в условной шкале высот; заштрихована полоса разрушения берега за 20 лет эксплуатации водохранилища)

Отметки поверхности перешейка на 20...40 м выше НПУ, длина вдоль напорного фронта 6,5 км, ширина в наиболее узком месте 750 м. Перешеек сложен ледниковыми и озерно-аллювиальными четвертичными отложениями. Преобладающими являются гравийно-галечниковые грунты с песчаным и супесчано-суглинистым заполнителем. Породы находятся в мерзлом состоянии. На глубине до 100 м в их толще встречаются включения ледяных прослоев и линз различного происхождения, отмечены повторно-жильные льды с глубиной жил 1...10 м. Инженерно-геологические условия позволяют предположить интенсивную термоабразионную переработку берега водохранилища

в районе перешейка. В связи с этим при проектировании гидроузла вопросы прогнозирования термоабразии перешейка и разработки берегозащитных мероприятий одни из главных.

За процессом термоабразии перешейка наблюдали более 20 лет. По результатам численно-аналитического расчета на рис. 2 представлены кривые $y = f(t)$ перемещения бровки надводного берегового уступа в глубь берега для сечения 2-2 при различных вариантах исходных условий (таблица); на рис. 3 – те же кривые для варианта 1 в разных сечениях берега [2]. Ноль вертикальной шкалы соответствует урезу среднелетнего уровня воды в момент начала расчета.

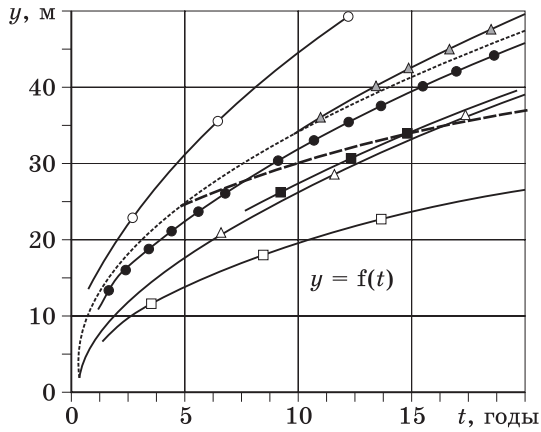


Рис. 2. Перемещение надводного берегового уступа в сечении 2–2 при переформировании берега водохранилища Амгуэмской ГЭС по вариантам расчета численно-аналитическим методом: 1; Δ 1л; \bullet 2; \square 3; \circ 4; \triangle 5; \blacksquare 6

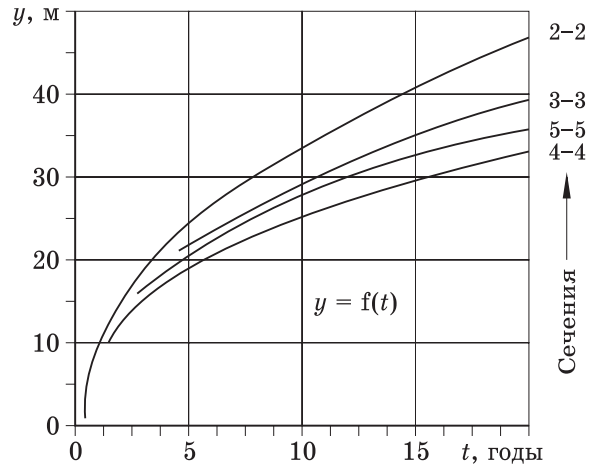


Рис. 3. Перемещение надводного берегового уступа при переформировании берега водохранилища Амгуэмской ГЭС на участке перешейка по расчету численно-аналитическим методом (вариант 1)

Варианты исходных данных в расчете термоабразии берега водохранилища Амгуэмской ГЭС

№ варианта	Мерзлый грунт	Температура мерзлого берега, °С	Температура мерзлого дна водохранилища, °С	Температура воды летняя, °С	Продолжительность волнения в летний сезон, сут
1	Без жильного льда	-7,6	-7,6	+6,4	77
1л	С жильным льдом	-7,6	-7,6	+6,4	77
2	Без жильного льда	-18,0	-7,6	+6,4	77
3	-	-7,6	-7,6	+2,0	77
4	-	-7,6	-7,6	+10,0	77
5	-	-7,6	-7,6	+6,4	50
5л	С жильным льдом	-7,6	-7,6	+6,4	50
6*	Без жильного льда	-	-7,6	+6,4	77

* Вариант 6 – расчет термоабразии по методике Ф. Э. Арэ – включает оценку объемов разрушения мерзлого берега посредством коэффициента его размываемости.

Адаптивным методом [5] кривые на рисунках 2, 3 усреднены на 20-летнем начальном периоде эксплуатации водохранилища и продлены еще на 10 лет (рис. 4, 5). В итоговых моделях динамики перемещения бровки надводного уступа наиболее значимыми составляющими являются линейный и логарифмический тренды: для сечения 2–2 (см. рис. 2, 3) – с весовыми коэффициентами соответственно 0,452 и 0,548; для всего перешейка – 0,445 и 0,555 (см. рис. 4, 5).

Как было установлено, при термоабразионном переформировании происходит оттаивание мерзлого грунта берега, а затем размыв оттаявшего грунта. При этом скорость переформирования определяется интенсивностью теплового процес-

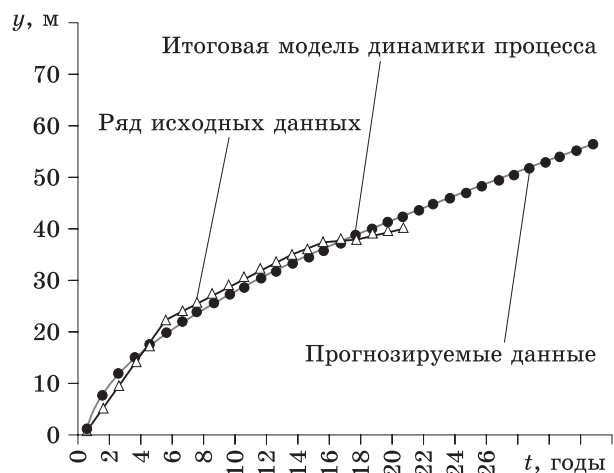


Рис. 4. Адаптивная модель перемещения надводного берегового уступа в сечении 2–2 при переформировании берега водохранилища Амгуэмской ГЭС

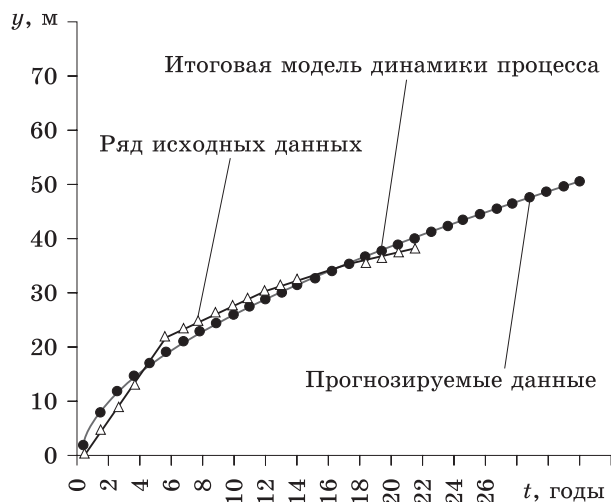


Рис. 5. Адаптивная модель перемещения надводного берегового уступа при переформировании берега водохранилища Амгуэмской ГЭС на участке перешейка

са [2]. Из приведенного примера видно, что начальная температура мерзлого берега значительного влияния на интенсивность термоабразии не оказывает, тогда как влияние температуры воды весьма велико. Существенно и влияние продолжительности волнения в летний сезон, регулирующего тепловое воздействие воды на мерзлый берег (см. рис. 2).

В первые годы после наполнения Амгуэмского водохранилища берег перешейка будет быстро разрушаться: за 5 лет его надводный уступ отступит примерно на 20 м со средней скоростью 4 м/год. Затем, вследствие роста береговой отмели, интенсивность теплоотдачи от воды к уступу уменьшится, разрушение замедлится. За 20 лет берег перешейка может отступить в среднем на 45 м (см. рис. 1), а к 30 годам эксплуатации водохранилища в стационарных климатических условиях еще на 10 м. В дальнейшем можно ожидать продолжения затухания процесса, так что разрушение перешейка на всю его ширину (750 м) в обозримом будущем маловероятно.

В заключение уместно подчеркнуть, что последовательное продвижение гидроэнергетического и водохозяйственного строительства на северо-восток страны повышает научное и практическое значение

прогнозов разрушения мерзлых берегов водохранилищ для обеспечения экологической безопасности искусственных водоемов в криолитозоне [1].

1. Научные основы совершенствования методов создания и эксплуатации водохранилищ речных гидроузлов / И. С. Румянцев [и др.]. – М.: ФГОУ ВПО МГУП, 2011. – 456 с.

2. Соболев С. В. Водохранилища в области вечной мерзлоты. – Н. Новгород: ННГАСУ, 2007. – 432 с.

3. Соболев И. С., Хохлов Д. Н. Развитие аналитического описания переформирования мерзлых берегов водохранилищ в криолитозоне // Приволжский научный журнал. – 2010. – № 1. – С. 72–80.

4. Соболев И. С., Хохлов Д. Н. Автоматизация инженерных расчетов берегоформирования на водохранилищах криолитозоны: Проблемы инженерного мерзлотоведения: материалы Международного симпозиума (3-7 сентября 2011 года, город Мирный). – Якутск: Изд-во ИМ СО РАН, 2011. – С. 115–120.

5. Громов Ю. А., Соболев И. С., Соболев С. В. Адаптивный метод экстраполяции данных наблюдений и прогнозирования характеристик абразии берегов эксплуатируемых водохранилищ // Водное хозяйство России. – 2012. – № 6. – С. 16–20.

6. Великин С. А., Соболев И. С., Хохлов Д. Н. Экспедиционные исследования переформирования берегов Вилюйского водохранилища в криолитозоне // Приволжский научный журнал. – 2012. – № 4. – С. 40–45.

Материал поступил в редакцию 09.10.12.

Румянцев Игорь Семенович, доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, зав. кафедрой «Гидротехнические сооружения»

Тел. 8 (095) 976-24-61.

Соболев Илья Станиславович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Гидротехнические сооружения»

Тел. 8 (831) 430-42-89

E-mail: gs@nngasu.ru