

АДАПТИВНЫЙ МЕТОД ЭКСТРАПОЛЯЦИИ ДАННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК АБРАЗИИ БЕРЕГОВ ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ ВОДОХРАНИЛИЩ *

© 2013 г. Ю.А. Громов, И.С. Соболев, С.В. Соболев

*Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет,
г. Нижний Новгород*

Ключевые слова: водохранилища, абразия берегов, адаптивный метод экстраполяции, прогнозирование абразии берегов.



Ю.А. Громов

И.С. Соболев

С.В. Соболев

Дано теоретическое обоснование адаптивного метода экстраполяции данных наблюдений и прогнозирования характеристик абразии берегов эксплуатируемых водохранилищ. В основу метода положена идея учета множества экспертных заключений в виде гипотетических трендов динамики процесса.

Введение

Как известно, наиболее интенсивному переформированию подвергаются обвальнo-осыпные абразионные берега. У равнинных водохранилищ, наполненных в 1950–1970-е годы, они уже несколько десятилетий пребывают в III стадии

* Работа выполнена по государственному заданию на 2012–2014 гг. подведомственным Минобрнауки России вузам на выполнение НИР № 7.4059.2011 «Экспериментальные и теоретические исследования поведения водохранилищ и плотин энергетических гидроузлов на эксплуатационной фазе жизненного цикла».

эволюции, характерной становлением берега и абразионно-аккумулятивной отмели. В силу неограниченности берегового процесса во времени его прогнозирование на современном этапе эксплуатации водохранилищ остается актуальным.

Исследование берегопереформирований 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 размытой породы, ширина береговой отмели, уклон отмели и т. д.); T – время; f – некоторая функция.

Для простоты исследования рассмотрены частные модели, преимущественно модель отступления бровки надводного берегового обрыва как наиболее информативная в практических целях.

Переформирование абразионных берегов – процесс многофакторный, причем часть факторов (волнение, уровень воды, геологическое строение берега и др.) имеет стохастическую природу. В 1970-х годах для описания и прогнозирования берегопереформирований на водохранилищах были опробованы вероятностные статистические модели, составившиеся по натурным данным о процессе за первые годы эксплуатации [1, 2]. Натурный график отступления бровки берега аппроксимировали теоретической кривой, для чего подбирали степенную, параболическую, логарифмическую функцию или полином 2-го порядка. Продление теоретической кривой за пределы периода наблюдений давало прогнозную характеристику берегопереформирования в рассматриваемом створе.

Однако область применения моделей указанного типа ограничена ближайшей окрестностью рабочих точек эксперимента. Строго говоря, подобные модели не допускают экстраполяцию в зону факторного пространства, где отсутствуют наблюдения [3]. Только ссылка на инерционность однонаправленного берегового процесса позволяла использовать статистические модели для прогнозирования его характеристик, причем лишь на ближайшую временную перспективу [2]. В практике такое прогнозирование распространения не нашло [4].

В статье дано теоретическое обоснование адаптивного метода экстраполяции данных наблюдений и прогнозирования характеристик абразии берегов эксплуатируемых водохранилищ. В основу метода положена идея учета множества экспертных заключений в виде гипотетических трендов динамики процесса.

Данные наблюдений

Наблюдаемые величины отступления бровки берегового обрыва со временем $y(t)$ в рассматриваемом створе образуют временной ряд, представленный выборкой

$$y(T_1), \dots, y(T_n). \quad (1)$$

Более общий случай обусловлен наличием нескольких временных рядов (данные по нескольким створам на участке наблюдений):

$$\begin{aligned} & y^1(T_1), \dots, y^1(T_{n1}); \\ & \quad \vdots \\ & y^m(T_1), \dots, y^m(T_{nm}). \end{aligned} \quad (2)$$

В этом случае осуществляется усреднение данных по формуле

$$y(T_i) = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m y^j(T_i). \quad (3)$$

Слагаемые в сумме (3) соответствуют тем рядам, для которых имеются значения $y^j(T_i)$ в момент времени T_i . Таким образом, в ходе первичной обработки нескольких рядов исходных данных получается усредненный временной ряд, аналогичный ряду (1).

Временной ряд, заданный или усредненный, является обычно неравномерной по времени выборкой значений $y(T)$. В связи с этим возникает необходимость в стандартизации ряда.

Стандартизация данных наблюдений

Стандартизация ряда наблюдений представляет процедуру вычисления значений функции $y(t)$ в интервале T_1, \dots, T_n с шагом $\Delta t = 1$:

$$y(T_1), y(T_1 + 1), \dots, y(T_1 + k), \dots, y(T_n). \quad (4)$$

Для реализации процедуры применена интерполяция данных, а именно, если $(T_1 + k)$ размещен в интервале $[T_e, T_{e+1}]$ двух заданных моментов времени, то

$$y(T_1 + k) = y(T_i) + \frac{y(T_{i+1}) - y(T_i)}{T_{i+1} - T_i} \cdot (T_1 + k - T_i). \quad (5)$$

В последующих расчетах использован полученный ряд $y(t)$, равномерно ($\Delta t = 1$) табулированный на временном интервале от T_1 до T_n .

Адаптивная экстраполяция данных наблюдений

Равномерно табулированный ряд (4) развивается на две части:

1) обучающая выборка

$$y(T_1), \dots, y(\tau); \tau < T_n; \quad (6)$$

2) экзаменационная выборка

$$y(\tau + 1), \dots, y(T_n). \quad (7)$$

По данным обучающей выборки (6) построен набор аппроксимирующих трендов

$$\Phi_1(t), \dots, \Phi_l(t), \quad (8)$$

каждый из которых представляет собой фиксированную формулу аргумента t , конкретизированную набором параметров (коэффициентов) этой формулы. Значения коэффициентов вычислены по данным обучающей выборки.

Для полученных трендов в каждый момент времени t вычислено относительное отклонение от значения ряда $y(t)$:

$$\sigma_i(t) = \frac{|y(t) - \Phi_i(t)|}{|y(t)|} \cdot 100\%; \quad i = 1, \dots, l. \quad (9)$$

Далее рассчитаны относительные коэффициенты достоверности

$$\nu_j(t) = \frac{\max_{i=1, \dots, l} \sigma_i(t) - \sigma_j(t)}{\max_{i=1, \dots, l} \sigma_i(t)} \quad (10)$$

и нормированные весовые коэффициенты

$$W_j(t) = \frac{\nu_j(t)}{\sum_{i=1}^l \nu_i(t)}, \quad j = 1, \dots, l. \quad (11)$$

Полученные коэффициенты позволяют учитывать экспертные гипотетические тренды в виде средневзвешенной оценки модельного временного ряда по формуле

$$Y(t) = \sum_{j=1}^l W_j(t) \cdot \Phi_j(t). \quad (12)$$

Здесь значение параметра t распространяется на всю длину временного ряда. В случае $t > \tau$ (τ – длина обучающей выборки) автоматически получается модель экстраполяции данных на временной период экзаменационной выборки ряда.

Далее определены относительные ошибки моделирования:
 ошибка в момент t

$$\delta_k(t) = \frac{|Y(t) - y(t)|}{|y(t)|} \cdot 100\%; \quad (13)$$

средняя ошибка по обучающей выборке

$$\delta_o = \frac{1}{\tau} \cdot \sum_{t=T_1}^{\tau} \delta_k(t); \quad (14)$$

средняя ошибка по экзаменационной выборке

$$\delta_s = \frac{1}{T_n - \tau} \cdot \sum_{\tau+1}^{T_n} \delta_k(t); \quad (15)$$

общая ошибка результата моделирования

$$\delta = \frac{1}{T_n - T_1 + 1} \cdot \sum_{k=T_1}^{T_n} \delta_k(t). \quad (16)$$

Оценка качества моделирования выполняется следующим образом:

- если $\delta \leq \delta_n$ (порог ошибки), то моделирование признается качественным;
- если $\delta_s > \delta_n$, то следует увеличить длину τ обучающей выборки;
- если $\delta_o > \delta_n$ и $\delta_s > \delta_n$ и $\tau = T_n - 1$, это свидетельствует о невозможности качественного моделирования ряда.

В процессе адаптивной экстраполяции данных наблюдений достигается следующее:

- механизм использования весовых коэффициентов $W_j(t)$, учитывающих качество приближения к заданному значению $y(t)$, позволяет в каждый момент времени осуществлять гибкое переключение к мнению того из «экспертов» $\Phi_1(t), \dots, \Phi_l(t)$, у которого получено лучшее приближение к $y(t)$;
- адаптация (самоприспособление) к мнению «экспертов» на интервале обучающей выборки $T_1 \leq t \leq (T_1 + \tau)$ дает максимально возможный по качеству приближения способ обучения;
- адаптация на интервале экзаменационной выборки $(T_1 + \tau) < t \leq T_n$ позволяет достичь наилучшей экстраполяции данных за пределы $(T_1 + \tau)$ обучающей выборки.

Адаптивное прогнозирование

Прогноз – это требование вычислить $Y(T_n + l)$ – значение ряда для момента времени $(T_n + l)$, выходящего в зону факторного пространства, где отсутствуют наблюдения.

Сначала проведены модельные расчеты по формуле (12) для нескольких (p) обучающих выборок различной длины (τ). При этом по (16) вычислены ошибки $\delta: \delta_{\tau_1}, \dots, \delta_{\tau_p}$. Далее для каждой из обучающих выборок выстро-

ены экстраполированные по формуле (12) на моменты $T_n + 1, \dots, T_n + q$ значения временных рядов:

$$\begin{aligned} & Y^1(T_n + 1), \dots, Y^1(T_n + q); \\ & \vdots \\ & Y^p(T_n + 1), \dots, Y^p(T_n + q). \end{aligned} \quad (16a)$$

Результирующий адаптивный прогноз формируется в виде средневзвешенной оценки экстраполированных значений с весовыми коэффициентами W_i^* , $i = 1, \dots, p$, вычисляемыми по формулам, аналогичным (10), (11), в которых вместо отклонений $\sigma_i(t)$ использованы сведения об ошибках $\delta_{\tau_1}, \dots, \delta_{\tau_p}$:

$$Y^*(T_n + l) = \frac{1}{p} \sum_{i=1}^p W_i^* Y^i(T_n + l). \quad (17)$$

Оценка предполагаемого качества прогноза осуществляется следующим образом.

Для прогнозных данных, полученных посредством выражения (17), вычислены абсолютные (Δ) и относительные (ε) средневзвешенные отклонения:

$$\Delta(T_n + l) = \frac{1}{p} \sum_{i=1}^p W_i^* \cdot |Y^*(T_n + l) - Y^i(T_n + l)|; \quad (18)$$

$$\varepsilon(T_n + l) = \frac{1}{p} \sum_{i=1}^p W_i^* \cdot \frac{|Y^*(T_n + l) - Y^i(T_n + l)|}{Y^*(T_n + l)} \cdot 100 \%. \quad (19)$$

Если эти величины не превышают установленных пороговых значений, результат прогноза считается приемлемым.

Для осуществления прогнозирования на длительную перспективу предложено искусственно увеличить обучающую выборку за счет введения значений временного ряда, полученных по формуле (17). Далее следует повторить алгоритм вычислений по формулам (6)–(17).

Программное обеспечение

В качестве средства автоматизации расчетов использована среда программирования Visual Basic for Application офисного приложения MS Excel [5]. В состав программного обеспечения включены следующие модули:

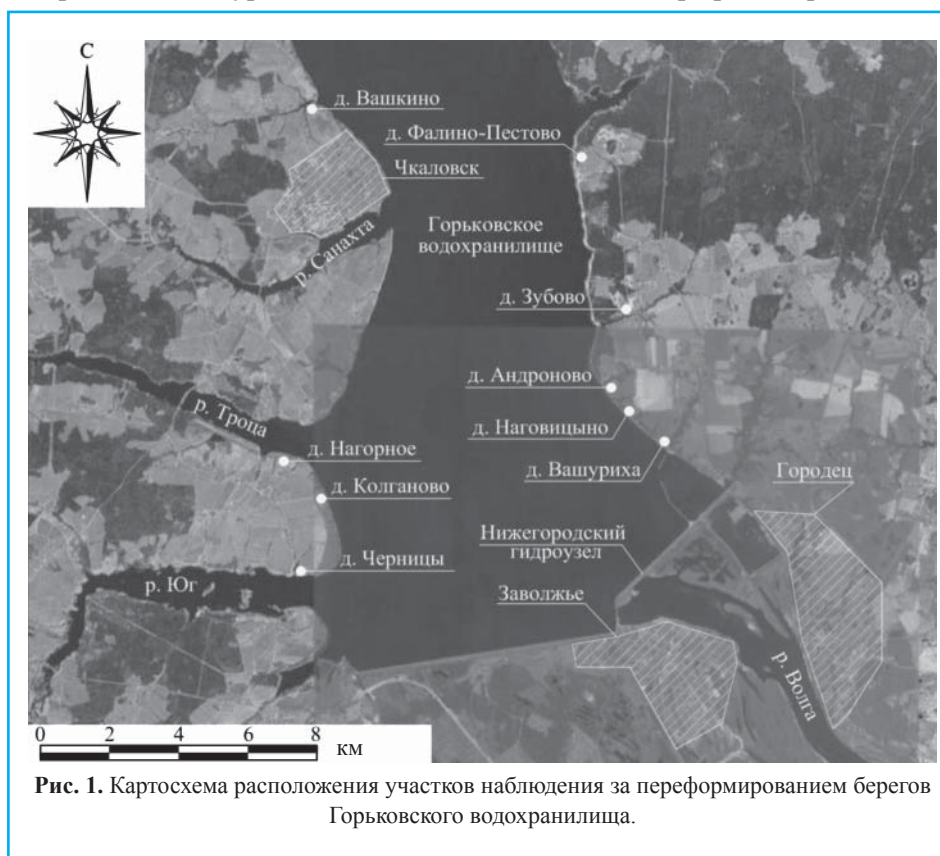
- усреднение – формула (3);
- интерполяция – формула (5);
- обучение – построение стандартных трендов $\Phi_i(t)$, включенных в состав BS Excel;

- аналитика – формулы (9)–(11);
- модель – формулы (12)–(16);
- прогноз – формулы (17)–(19).

Пример Горьковского водохранилища

Адаптивный метод прогнозирования применен к процессу берегоперестройки Горьковского водохранилища на р. Волге. Отвлеченно от способа измерения современная длина береговой линии водохранилища, наполненного до НПУ=84,00 м БС в 1957 г., дается величиной 2168 км (исключая подпертые участки притоков). Из них абразионных берегов 631 км, в т. ч. в рыхлых аллювиальных, флювиогляциальных, моренных отложениях – 449 км, в плотных глинах, глинистых брекчиях – 182 км [6].

Имеются данные инструментальных наблюдений обвално-осыпных абразионных берегов озерной части водохранилища (рис. 1) за период 1957–2010 гг. [7]. На рис. 2 показан план участка № 1 между деревнями Андроновое и Вашуриха, общий вид и наблюдаемые профили берега в створе



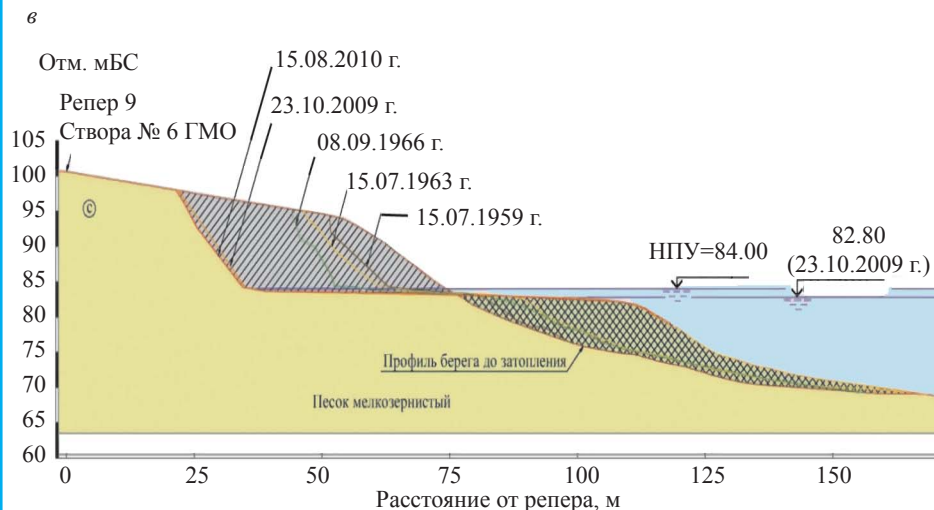


Рис. 2. Участок наблюдений №1 Андроново – Ващуриха:
а – схема расположения створов; *б* – вид в 2009 г.;
в – наблюдаемые профили берега в створе 6 ГМО.

Таблица 1. Натурные данные об отступании бровки обвального-осыпного абразионного берега Горьковского водохранилища на участке № 1 Андроновое – Вашуриха

Дата измерения	Отступление бровки берега, м					
	по створам					среднее по участку
	№ 32	№ 7 ГМО	№ 6 ГМО	№ 4 ГМО	№ 3 ГМО	
1957 г.	0	0	0	0	0	0
15.07.1959	23,33	–	23,11	–	36,33	27,59
15.05.1960	–	28,00	–	27,49	–	–
15.08.1961	27,74	–	–	–	–	–
15.07.1963	–	31,35	28,06	30,11	43,32	33,21
08.09.1966	31,33	33,99	30,37	35,82	43,94	35,09
04.07.1971	35,43	37,60	34,00	40,58	47,40	39,00
10.09.1985	45,15	47,50	43,20	52,55	53,21	48,32
23.10.2009	48,70	58,65	52,66	68,77	60,87	57,93
15.08.2010	48,70	59,60	52,80	69,10	61,30	58,30

Примечание: прочерк означает отсутствие данных.

ре № 6 ГМО (Гидрометеорологическая обсерватория). В табл. 1 приведены натурные данные об отступании бровки берегового обрыва в пяти створах на этом участке, а на рис. 3 они представлены в графическом виде. Для данного участка приведен пример прогнозирования берегопереформирования. Первые два года (1957–1958) наиболее интенсивного берегообрушения

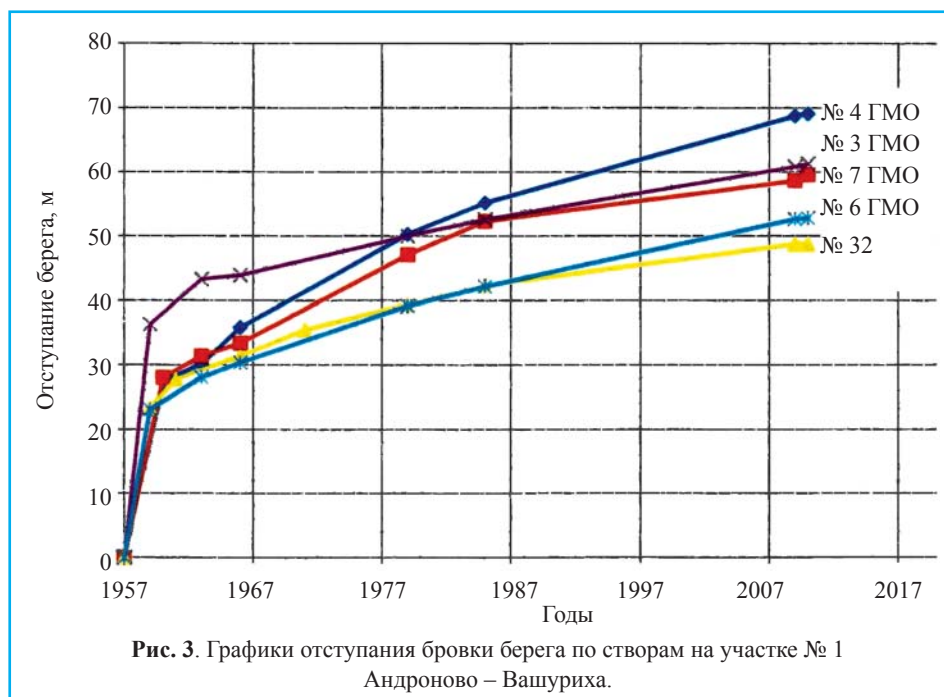


Таблица 2. Итоговый прогноз отступления бровки берега на участке № 1 Андроновое – Вашуриха по результатам экстраполяции данных на основе нескольких обучающих выборок

Год	Обучающая выборка за период, год				Отступление бровки берега: результирующий прогноз, м	Средневзвешенные оценки		Скорость отступления бровки берега, м/год
	1959–1975	1959–1984	1959–2000	1959–2010		абсолютного отклонения, м	относительного отклонения, %	
	Ошибка модельного приближения, %							
	5,3	0,7	0,9	1,0				
	Относительный коэффициент значимости результата модельного приближения							
	0,000	0,868	0,830	0,811				
	Нормированный весовой коэффициент учета результата прогноза							
	0,000	0,346	0,331	0,323				
2011	50,16	58,21	58,90	58,81	58,63	0,29	0,5	
2012	50,15	58,51	59,25	59,19	58,97	0,32	0,5	0,34
2013	50,13	58,81	59,59	59,56	59,31	0,35	0,6	0,34
2014	50,09	59,10	59,93	59,92	59,64	0,38	0,6	0,33
2015	50,04	59,38	60,26	60,29	59,96	0,40	0,7	0,32
2016	49,98	59,65	60,58	60,65	60,28	0,43	0,7	0,32
2017	49,91	59,92	60,90	61,00	60,60	0,47	0,8	0,31
2018	49,83	60,18	61,22	61,35	60,90	0,50	0,8	0,31
2019	49,74	60,44	61,53	61,70	61,21	0,53	0,9	0,30
2020	49,63	60,69	61,84	62,04	61,51	0,56	0,9	0,30
2021	49,51	60,93	62,14	62,38	61,80	0,60	1,0	0,29
2022	49,38	61,17	62,43	62,72	62,09	0,63	1,9	0,29
2023	49,24	61,40	62,72	63,05	62,37	0,67	1,1	0,28
2024	49,09	61,63	63,01	63,38	62,65	0,71	1,1	0,28
2025	48,93	61,85	63,29	63,71	62,93	0,74	1,2	0,27
2026	48,76	62,07	63,56	64,03	63,19	0,78	1,2	0,27
2027	48,58	62,27	63,83	64,35	63,46	0,82	1,3	0,26
2028	48,39	62,48	64,10	64,66	63,72	0,86	1,3	0,26
2029	48,18	62,68	64,36	64,98	63,98	0,90	1,4	0,26
2030	47,97	62,87	64,61	65,29	64,23	0,94	1,5	0,25

после наполнения водохранилища из рассмотрения исключены. Теоретические кривые, полученные по данным обучающих выборок за периоды 1959–1975, 1959–1984, 1959–2000 и 1959–2010 гг., дали ошибки модельного приближения на отрезке времени до 2010 г.: 5,3; 0,7; 0,9 и 1,0 % соответственно (табл. 2).

Для примера на рис. 4 графически выведен усредненный по пяти створам ряд данных наблюдений отступления бровки берегового обрыва из табл. 1, равномерно табулированный на временном интервале от 1959 до 1984 гг. На этом же рисунке показан набор стандартных трендов по обучающей выборке. На рис. 5 приведена теоретическая кривая, полученная по

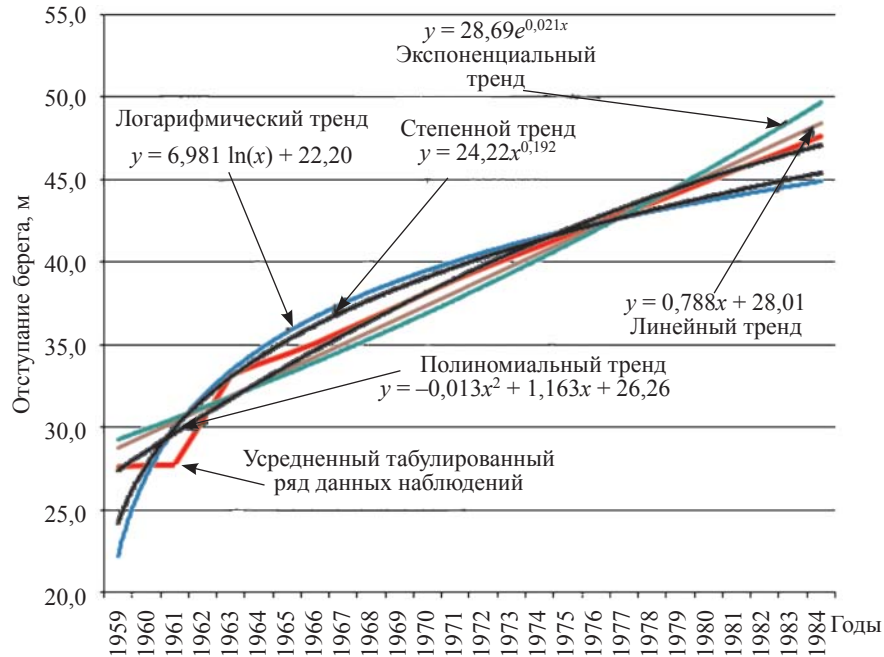


Рис. 4. Табулированный ряд данных наблюдений и тренды по усредненной обучающей выборке за период 1959–1984 гг. на участке № 1 Андроновое – Вашуриха.

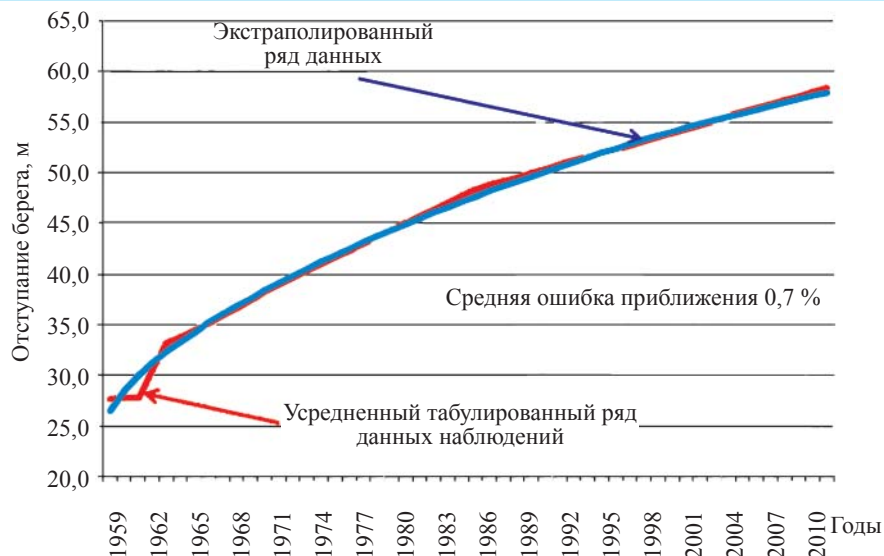


Рис. 5. Результаты адаптивной экстраполяции данных наблюдений на участке № 1 Андроновое – Вашуриха по усредненной обучающей выборке 1959–1984 гг.

данным обучающей выборки 1959–1984 гг. и давшая на отрезке времени до 2010 г. ошибку экстраполяции 0,7 %.

В табл. 2 представлены ряды экстраполированных данных по нескольким обучающим выборкам на период с 2011 по 2030 гг. На основании этих данных получен результирующий прогноз с относительным отклонением, не превышающим 0,9 % в конце 10-летнего периода прогноза, соответствующего 2020 г., и 1,5 % в конце 20-летнего периода, соответствующего 2030 г.

Согласно прогнозу, средняя величина отступления бровки берега на участке № 1 составит от 58,3 м в 2010 г. (см. табл. 1) до $(61,5 \pm 0,5)$ м к 2020 г. и до $(64,2 \pm 0,9)$ м к 2030 г. (см. табл. 2). Если средняя скорость отступления бровки берега по наблюдениям в 2009–2010 гг. была 0,37 м/год (см. табл. 1), то в 2019–2020 гг. она ожидается 0,30 м/год, а в 2029–2030 гг. – 0,25 м/год, обещая некоторое затухание абразии (см. табл. 2).

При осуществлении поучасткового прогноза следует иметь в виду, что характер кривых $y(t)$ в разных береговых створах может быть существенно различным и не дать основания для их обобщения. Осредненную кривую $y(t)$ можно строить только для однородных в отношении переработки инженерно-геологических участков берега.

Прогноз по периметру озерной части (см. рис. 1) показал, что на предстоящее 10-летие можно ожидать переформирование абразионных берегов Горьковского водохранилища со средней скоростью 0,1–0,4 м/год. При 631 км протяженности абразионных берегов риск потери земель составит 6,3–25,2 га/год, что существенно меньше публикующихся величин (200 га/год) [8].

Выводы

Разработанный адаптивный метод при наличии продолжительного ряда наблюдений позволяет прогнозировать характеристики процесса переформирования по створам и участкам абразионных берегов эксплуатируемых водохранилищ на недалекую перспективу с высокой достоверностью.

Пример Горьковского водохранилища показывает, что публикующиеся прогностические данные о потерях земель при отступании берегов крупных эксплуатируемых водохранилищ могут быть необоснованно завышенными, как прежде уже отмечалось по Волжскому каскаду [9].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коломенский Н.В., Иванова И.И. Статистический подход к обработке данных наблюдений за переработкой берегов водохранилищ // Тр. Гидропроекта. М.: Энергия, 1974. Вып. 36. С. 97–113.

2. Епишин В.К., Экзарьян В.Н. Прогноз процесса формирования берегов водохранилищ. М.: Энергия, 1979. 112 с.
3. Кобзарь А.И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников. М.: Физматлит, 2006. 816 с.
4. Максимчук В.Л. Рациональное использование и охрана берегов водохранилищ. Киев: Будівельник, 1981. 112 с.
5. Гарнаев А.Ю., Рудникова Л.В. Microsoft Office Excel 2010: разработка приложений. СПб: БХВ–Петербург, 2011. 528 с.
6. Водохранилища Верхней Волги / Авторский коллектив: рук. В.С. Дементьев. Н. Новгород: Верхне-Волжское БВУ, 2008. 156 с.
7. Соболев С.В., Иконников Л.Б., Соболев И.С., Хохлов Д.Н. Возобновление долгосрочных инструментальных наблюдений за переформированием абразионных берегов Горьковского водохранилища // Приволжский научный журнал. 2010. № 5. С. 40–47.
8. Малик Л.К. Факторы риска повреждения гидротехнических сооружений. Проблемы безопасности. М.: Наука, 2005. 354 с.
9. Каякин В.В. Современные задачи и практика инженерно-геологических изысканий при проектировании крупных водохранилищ // Гидротехническое строительство. 1989. № 10. С. 28–32.

Сведения об авторах:

Громов Юрий Алексеевич, старший преподаватель кафедры информационных систем и технологий, ФГБОУ ВПО Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет (ННГАСУ), 603950, г. Нижний Новгород, ул. Ильинская, 65

Соболев Илья Станиславович, к. т. н., доцент кафедры гидротехнических сооружений, ФГБОУ ВПО Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет (ННГАСУ), 603950, г. Нижний Новгород, ул. Ильинская, 65; e-mail: gs@nngasu.ru

Соболев Станислав Владимирович, д. т. н., профессор, заведующий кафедрой гидротехнических сооружений, проректор по научной работе, ФГБОУ ВПО Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет (ННГАСУ), 603950, г. Нижний Новгород, ул. Ильинская, 65; e-mail: nir@nngasu.ru