

ПОСТРОЕНИЕ ПРОГНОЗНОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ПЛОТИНЫ САЯНО-ШУШЕНСКОЙ ГЭС

Наталья Николаевна Кобелева

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, старший преподаватель кафедры физической геодезии и дистанционного зондирования, тел. (383)343-29-11, e-mail: n.n.kobeleva@mail.ru

Валерий Степанович Хорошилов

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, доктор технических наук, профессор кафедры физической геодезии и дистанционного зондирования, тел. (383)343-29-11, e-mail: Khoroshilovvs@mail.ru

В статье рассматривается подход к построению прогнозной математической модели для изучения процесса перемещений контролируемых точек гребня плотины Саяно-Шушенской ГЭС с целью изучения качественных изменений наблюдаемых деформационных процессов сооружения. Показана последовательность выполнения этапов оценивания при построении прогнозной модели в зависимости от характера прогностической задачи.

Ключевые слова: геодезические данные, прогнозная математическая модель, прогнозирование, перемещения контролируемых точек, деформации сооружения.

BUILD A PREDICTIVE MATHEMATICAL MODEL OF MOTION OF THE DAM SAYANO-SHUSHENSKAYA HPP

Natalia N. Kobeleva

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., a senior lecturer in physical geodesy and remote sensing, tel. (383)343-29-11, e-mail: n.n.kobeleva@mail.ru

Valery S. Khoroshilov

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., Ph. D., Prof. of Department of physical geodesy and remote sensing, tel. (383)343-29-11, e-mail: khoroshilovvs@mail.ru

In article approach to creation of expected mathematical model for studying of process of movements of controlled points of a crest of a dam of Sayano-Shushenskaya hydroelectric power station for the purpose of studying of high-quality changes of observed deformation processes of a construction is considered. The sequence of performance of stages of estimation at creation of expected model depending on character of a predictive task is shown.

Key words: geodetic data, expected mathematical model, forecasting, movements of controlled points, deformations of a construction.

Разработка прогнозных математических моделей является обязательным условием диагностического контроля плотины СШГЭС в соответствии с принятой «Методикой определения критериев безопасности гидротехнических со-

оружении» [1] и рекомендациями Федерального закона [2]. Существенный вклад в разработку прогнозных математических моделей отражен в работах [4,5,7], методологический подход в [3,6,8,9].

Осенью 1990 г. водохранилище Саяно-Шушенской ГЭС было впервые наполнено до проектной отметки (НПУ = 540 м) и с 1991 года ГЭС и её сооружения вышли на проектный эксплуатационный режим [7]. В этом режиме для плотины характерно циклическое изменение основной нагрузки – гидростатического давления верхнего бьефа (УВБ) на верховую грань плотины и дно водохранилища. Каждый цикл имеет две ветви – ветвь нагружения (наполнение водохранилища: май-октябрь); ветвь разгрузки (сработка водохранилища: ноябрь-апрель).

В соответствии с принятыми положениями [1] в качестве одного из диагностических показателей контроля Саяно-Шушенской ГЭС выбраны радиальные перемещения гребней плотины: левобережной секции 18, ключевой секции 33 и правобережной секции 45, измеренные отвесами и соответствующие им значения параметров УВБ и температура бетона $T_{низ}, T_{верх}$ в базовых точках [7], а также представлены прогнозные математические модели регрессионного типа для различных периодов работы плотины: 2004-2007; 2007-2009 и 2009-2014 годы.

В качестве исходных данных для построения динамической модели были использованы данные измерений за 2004-2007 годы, полученные на основании графика (рис.1) из работы [7] (необходимые данные натуральных перемещений гребня плотины отсутствуют в открытой печати). В связи с этим, авторы не претендуют на точность прогнозной математической модели, скорее больший интерес представляет методический подход к её построению.

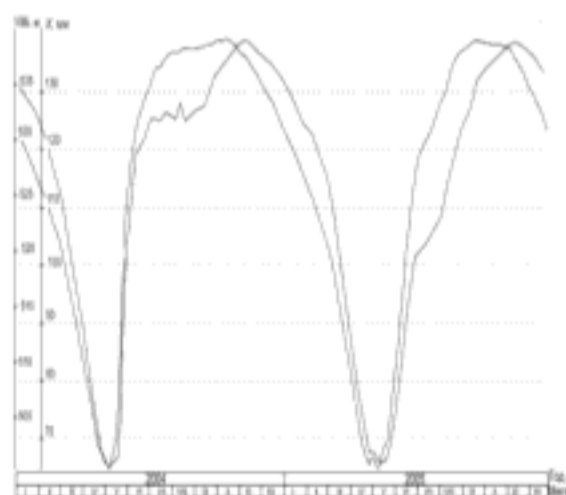


Рис. 1. Изменение диагностического показателя (радиального перемещения гребня плотины) и параметров-аргументов: УВБ и температура бетона в базовой точке $T_{низ}$ во времени: --- верхний бьеф; --- температура бетона (секция 33); --- радиальные перемещения.

Одним из вариантов для построения динамической модели может служить рекуррентное уравнение 1-го порядка процесса перемещения, происходящего под воздействием одного из основных факторов, а остаточная часть процесса описывается дополнительно моделью шумовой компоненты, т.е. путем расширения вектора состояний [10-12].

Стационарную динамическую модель представим в виде выражения:

$$x_k = \phi x_{k-1} + \beta u_k + \gamma \omega_k. \quad (1)$$

Заменим в выражении (1) значения x_k и u_k их центрированными по времени значениями $\tilde{x}_k = x_k - \bar{x}$ и $\tilde{u}_k = u_k - \bar{u}$ (\bar{x} и \bar{u} – средние величины перемещения и входного параметра: уровень верхнего бьефа на годичном интервале, взятом за период основания прогноза). Это позволяет не только определить \tilde{x}_k , как будет показано ниже, но и упрощает вычисления, повышая тем самым степень обусловленности системы нормальных уравнений, решаемых для оценивания параметров.

При построении модели в качестве основного входного фактора использовался уровень верхнего бьефа (гидростатическое давление) за период с января 2004 г. по январь 2005 г. (табл. 1). Все исходные данные (уровень верхнего бьефа и результаты перемещений гребня плотины) получены на середину каждого месяца.

Таблица 1

Исходные данные для построения прогнозной модели

Исходные данные математической модели			Остаточные ошибки
Дата, месяц	УВБ, м	$x_{вых}$, мм	ε
1	2	3	4
Янв. 2004	528,8	128,15	-
февраль	523,6	119,26	+5,917
март	516,4	100,74	+0,163
апрель	505,0	76,67	-2,720
май	503,6	66,67	-7,435
июнь	532,2	120,00	+7,242
июль	537,2	125,18	-6,798
август	538,4	125,91	-9,007
сентябрь	538,6	127,41	-7,968
октябрь	539,2	135,92	-0,688
ноябрь	537,0	138,52	+3,347
декабрь	533,6	134,44	+3,801
Янв. 2005	528,6	127,04	+4,806

На первом этапе построения динамических моделей методом МНК оценивались параметры по результатам наблюдений за входом $\{u_k\}$ и выходом $\{x_k\}$ на периоде основания прогноза $k=1,2,\dots,N$. Для этого минимизировался функционал $F_1(\phi, \beta) = \sum_{k=2}^N (x_k - \hat{x}_{k/k-1})^2$; через $\hat{x}_{k/k-1}$ обозначено условное математическое ожидание уравнения (1) определяющееся выражением:

$$M \{x_k / x_{k-1}, u_k\} = \hat{x}_{k/k-1} = \varphi x_{k-1} + \beta u_k. \quad (2)$$

Оценки параметров φ, β находили из решения полученных систем нормальных уравнений.

$$\begin{aligned} \text{Модель: } 6041,2816\hat{\varphi} + 1695,9849\hat{\beta} &= 3873,7474; \\ 1695,9849\hat{\varphi} + 1838,7504\hat{\beta} &= 3133,9478. \end{aligned} \quad (3)$$

Из решения системы (3) были получены параметры:

$\hat{\varphi} = 0,2196; \hat{\beta} = 1,5018$. После вычисления оценок $\hat{\varphi}, \hat{\beta}$ находили оценку \hat{x}_0 из выражения $\hat{x}_0 = \bar{x}(1 - \bar{\varphi}) - \hat{\beta}\bar{u}$; оно получилось равным $\hat{x}_0 = -701,141$ мм.

Остаточные ошибки (табл.1) характеризуют, с одной стороны: – корректность построения модели с точки зрения структурной идентификации; с другой, – это характеристика свойств шумовой компоненты ω_k , т.е. используя остаточные ошибки $\varepsilon_k = x_k - \hat{x}_{k/k-1} = \gamma\omega_{k-1}$ можно произвести математическое описание процесса шума ω_k известными моделями авторегрессии 1-го или 2-го порядков [13].

Для определения порядка модели авторегрессии и выполнения второго этапа оценивания параметров вычислялись асимптотически несмещенные оценки корреляционной функции [14] остаточных ошибок по формуле:

$$\hat{K}_\varepsilon[m] = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^{N-m} \varepsilon_k \varepsilon_{k+m}, \quad (4)$$

где временной сдвиг $m = 0, 1, 2, \dots, M < N$.

Построенный график корреляционной функции (рис. 2) свидетельствует о том, что описание процесса шума для модели следует производить моделью авторегрессии 2-го порядка. Шумовая компонента модели авторегрессии 2-го порядка [14] имеет вид:

$$\omega_k = \mu\omega_{k-1} + \eta\omega_{k-2} + \xi_k, \quad (5)$$

где μ, η – оцениваемые параметры.

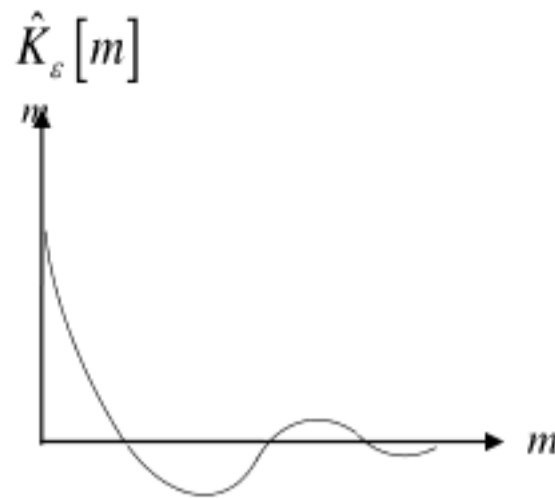


Рис. 2. График корреляционной функции

Оценка этих параметров производилась путём минимизации функционала:

$$F_2(\mu, \eta) = \sum_{m=1}^M \left(\hat{K}_\varepsilon[m] - \mu \hat{K}_\varepsilon[m-1] - \eta \hat{K}_\varepsilon[m-2] \right)^2, \text{ т.е. } \mu, \eta \text{ находились из решения соответствующей системы нормальных уравнений, а оценка коэффициента } \gamma \text{ осуществлялась по формуле [8]:}$$

где $\hat{K}_\omega[0] = \frac{1-\hat{\eta}}{(1+\hat{\eta})[(1-\hat{\eta})^2 - \hat{\mu}^2]}$.

$$\hat{\gamma} = \sqrt{\frac{\hat{K}_\varepsilon[0]}{\hat{K}_\omega[0]}}, \quad (6)$$

где $\hat{K}_\omega[0] = \frac{1-\hat{\eta}}{(1+\hat{\eta})[(1-\hat{\eta})^2 - \hat{\mu}^2]}$.

Для оценивания параметров АР2 были получены следующие системы нормальных уравнений, по которым были вычислены оценки параметров $\hat{\mu}; \hat{\eta}; \hat{\gamma}$.

$$\begin{aligned} 1260,9663\hat{\mu} + 514,8224\hat{\eta} &= 289,5179; \\ 514,8224\hat{\mu} + 1307,1876\hat{\eta} &= 49,6265. \end{aligned} \quad (7)$$

$$\hat{\mu} = +0,2551; \hat{\eta} = -0,0625; \hat{\gamma} = 5,5246$$

Таким образом, были получены все оценки параметров модели, которые представляются в следующем виде:

$$\begin{aligned} x_k &= 0,2196x_{k-1} + 1,5018u_k - 701,141 + 5,5321\omega_k; \\ \omega_k &= 0,2551\omega_{k-1} - 0,0625\omega_{k-2} + \xi_k. \end{aligned} \quad (8)$$

Условные математические ожидания в соответствии с (7 и 8) имеют вид:

$$\begin{aligned} \hat{x}_k &= 0,2196\hat{x}_{N+i-1/N} + 1,5018u_{N+i} - 701,141 + 5,5321\omega_{N+i-1/N}; \\ \hat{\omega}_{N+1/N} &= 0,2551\hat{\omega}_{N+i-1/N} - 0,0625\hat{\omega}_{N+i-2/N} \end{aligned} \quad (9)$$

При $\hat{x}_{N/N} = x_N = 134,44 \text{ мм}$;

$$\hat{\omega}_{N/N} = \hat{\mu} \frac{\varepsilon_N}{\hat{\gamma}} + \hat{\eta} \frac{\varepsilon_{N-1}}{\hat{\gamma}} = 0,2551 \frac{+3,801 \text{ мм}}{5,5321} - 0,0625 \frac{+3,347 \text{ мм}}{5,5321} = 0,1375 \text{ мм}.$$

Результаты прогнозирования методом инверсной верификации представлены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты прогнозирования процесса перемещения гребня плотины

$X_{\text{перемещ.2005}}$ мм	Дата прогноза, месяц	Прогнозная модель	
		$X_{\text{прогн.}}$ мм	$\Delta_{\text{к2}}$, мм
1	2	5	6
127,04	Янв.2005	129,14	-2,10
120,26	февраль	113,16	+7,10
100,51	март	93,14	+7,37
75,64	апрель	63,21	+12,43
66,15	май	80,57	-14,42
91,80	июнь	101,77	-9,97
104,62	июль	113,40	-8,78
116,67	август	121,52	-4,85
130,00	сентябрь	134,03	-4,03
135,64	октябрь	140,98	-5,34
138,21	ноябрь	140,91	-2,70
134,36	Дек.2005	129,03	+5,33

Выводы.

1. Построенная прогнозная модель позволяют отслеживать основные закономерности развития процесса деформации гребня плотины.

2. Большинство ошибок прогноза перемещений $\Delta_{\text{к}}$ в сравнении с самими перемещениями за исключением отдельных месяцев лежат в пределах графической точности полученных исходных данных по обеим построенным моделям (неточность исходных данных с использованием рис. 1 вносит неточность в результаты прогнозирования).

3. Большие по величине ошибки прогнозирования приходятся на время конца срабатывания и начала нагружения плотины (апрель-июнь); очевидно, что инъецирование трещин [7] изменило характер работы плотины, что препятствует возврату плотины в исходное состояние. Представляется, что для данного периода работы плотины необходимо строить отдельные прогнозные модели.

4. Повысить точность прогнозирования возможно за счет увеличения периода основания прогноза при построении модели (включение нескольких лет натуральных наблюдений в период основания прогноза), что планируется показать в последующем при построении прогнозной модели 2007-2009 годов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Методика определения критериев безопасности гидротехнических сооружений. РД 153-34.2-21.342-00. – М. 2001. – 80 с.
2. Ф1.22. Федеральный закон «О безопасности гидротехнических сооружений / Собрание законодательства Российской Федерации. – 1997. – № 30. – Ст. 3589.
3. Дурчева В. Н., Пучкова С. М., Загрядский И. И. Учет сезонных изменений схемы работы бетонных плотин при анализе данных натуральных измерений // Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. – 2000. – № 237. – С. 45–53.
4. Гордон Л. А., Соколовский И. К., Цовикян Л. Х. Прогноз перемещений арочной плотины на основе идентифицированной прогнозной модели // Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. – 1989. – Т. 214. – С. 124–132.
5. Александров Ю. Н. Использование расчетной модели плотины Саяно-Шушенской ГЭС для оценки и прогнозирования ее состояния // Гидротехническое строительство. – 2008. – № 11. – С. 64–69.
6. Параметрическая идентификация расчетных моделей гидротехнических сооружений / Д. А. Ивашинцов, А. С. Соколов, С. Г. Шульман, А. М. Юделевич. – СПб: Изд-во ОАО «ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева». 2001. – 432 с.
7. Вульфович Н. А., Гордон Л. А., Стефаненко Н. И. Арочно-гравитационная плотина Саяно-Шушенской ГЭС (Оценка технического состояния по данным натуральных наблюдений). – СПб.: Изд-во ОАО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева», 2012. – 107 с.
8. Гуляев Ю. П. Прогнозирование деформации сооружений на основе результатов геодезических наблюдений. – Новосибирск: СГГА, 2008. – 256 с.
9. Гуляев Ю. П., Хорошилов В. С., Лисицкий Д. В. О корректном подходе к математическому моделированию деформационных процессов инженерных сооружений по геодезическим данным // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2014. – № 4С. – С. 22–30.
10. Хорошилов В.С., Павловская О.Г. Математическое моделирование оползневых процессов по геодезическим данным в условиях проведения взрывных работ и вывоза грунта // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2014. X Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 8–18 апреля 2014 г.). – Новосибирск: СГГА, 2014. Т. 1. – С. 156–161.
11. Гуляев Ю. П., Каленицкий А. И. Структурная идентификация прогнозных моделей локальной техногенной геодинамики и деформаций // Совр. проблемы геодезии и оптики: Тез. докл. – Новосибирск, СГГА, 1998. – С. 121.
12. Павловская О. Г., Хорошилов В. С. Методика выделения однородных оползневых зон по результатам геодезических наблюдений // ГЕО-Сибирь-2011. VII Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 19–29 апреля 2011 г.). – Новосибирск: СГГА, 2011. Т. 1, ч. 1. – С. 84–88.
13. Гуляев Ю. П., Хорошилов В. С. Математическое моделирование. Прогнозирование деформаций сооружений гидроузлов по геодезическим данным. – Новосибирск: СГГА, 2014. – 78 с.
14. Бокс Дж., Дженкинс Г. Анализ временных рядов. Прогноз и управление. – М.: Мир, 1974. Вып.1. – 405 с. Вып.2. – 197 с.

© Н. Н. Кобелева, В. С. Хорошилов, 2015