

В. М. МЕЛЬНИК, Т. М. СТОВПНИК, Ю. П. МАКСИМЮК

АНАЛІЗ ГЕОДЕЗИЧНИХ СПОСТЕРЕЖЕНЬ  
ЗА ЗМІЩЕННЯМИ ЗЕМЛЯНОЇ ГРЕБЛІ ХАЕС

Греблі за рівнем складності розвитку в них деформаційних процесів та ступенем відповідності мають у декілька разів вищий порядок, ніж будь-яка гідротехнічна споруда іншого типу. У статті розглядаємо питання геодезичного контролю деформації, що виникають у ґрунтових греблях. Вони можуть викликатися розсіюванням пористого тиску в ґрунті тіла греблі та її основи, збільшенням стискуваності ґрунту з підвищенням його вологості при підйомі верхнього б'єфа, повзучістю ґрунту, змінами фільтраційно-суфозійних властивостей та іншими. Оцінка всіх цих впливів методами механіки ґрунтів затруднена [1].

Досить ефективне вивчення і прогнозування деформацій земляних гребель можливе на основі системного підходу, коли, по-перше, математична модель явища і спостережувані за допомогою вимірювальних приладів окремі його властивості розглядаються як єдина інформаційна система, по-друге, на мікрорівні вивчаються зміни властивостей міцності ґрунтів. Системний підхід передбачає розробку динаміко-стохастичної моделі, стохастична частина якої підвищує точність прогнозування за рахунок застосування оптимальної фільтрації, зокрема оптимальної лінійної фільтрації.

У загальному вигляді задача прогнозування випадкового процесу значень контрольних вимірів виглядає таким чином. Нехай відомі значення контрольних вимірів  $y_k$  на деякому інтервалі  $t_0 \leq \tau \leq t_j$ . На основі цих значень встановлюються умовні закони розподілу ймовірностей зв'язаного з процесом  $\{y\}$  процесу  $\{z\}$  на інтервалі  $[t_0, t_j]$ , а також за його межами. Знаходження умовних середніх значень, тобто оцінок  $\bar{z}$  при  $\tau > t_j$  — завдання прогнозу. Прогнозування виконується за таким алгоритмом [5]:

$$\bar{z}(t+1/t) = \Psi(t+1, t)\bar{z}(t/t-1) + K(t)\bar{y}(t); \quad (1)$$

$$K(t) = [\Phi(t+1, t)Q(t/t-1)H^T(t) + \Gamma(t+1, t) \times \\ \times C(t)] [H(t)Q(t/t-1)H^T(t) + R(t)]^{-1}; \quad (2)$$

$$\Psi(t+1, t) = \Psi(t+1, t)\bar{z}(t/t-1) + K(t)\bar{y}(t), \quad (3)$$

де  $\Phi$  — перехідна матриця, яка описує перетворення вектора в просторі стану; матриця  $\Gamma$  передбачає функцію управління дина-

мічною системою; матриця  $H(t)$  показує, що вектор  $\bar{z}(t)$  зв'язаний з вектором вимірювань  $\bar{y}(t)$  і характеризує властивості процедури вимірювань; матриця  $C(t)$  враховує можливу кореляцію між білим шумом та помилками спостережень; матриця  $K(t)$  показує, яка кількість інформації відносно стану системи  $\bar{z}(t+1)$  міститься в помилках фільтрації  $\bar{y}(t/t-1)$ ;  $Q(t/t-1)$  — матриця умовних коваріацій помилок фільтрації.

Оптимальний режим фільтрації дає змогу за допомогою моделей (1)–(3) створювати методи прогнозу процесу адаптації, що мають високу точність. Однак складність коректного отримання всіх її параметрів і відсутність обґрунтованих математичних моделей контрольних спостережень утруднює практичну реалізацію (1)–(3). Тому на практиці часто обмежуються статистичним аналізом даних спостережень та побудовою прогнозних моделей з певними спрощеннями.

Далі описано подібний підхід до аналізу процесу осідання земляної греблі водосховища Хмельницької АЕС. Довжина греблі 7,2 км, висота — 20 м. На цей час проведено 15 циклів спостережень. Висотна сітка греблі складається з нівелірних ходів II класу точності і двох куців глибинних реперів. Нівелювання з урахуванням вимог Інструкції [3] з деякими змінами методики спостережень: довжина візуючого променя до 30 м, різниця перевищень, отриманих з основної і додаткових шкал рейок на станції, допускається не більше 10 поділок відлікового барабану нівеліра, як перехідні точки використовуються дюбелі, закріплені зверху бетонного парапету.

Для визначення горизонтальних зміщень розроблена сітка з шести пунктів мікротриангуляції та 34 пунктів полігонометрії. Результати виконаних геодезичних вимірювань протягом 3,5 року свідчать про нерівномірність перебігу деформаційного процесу, динаміка якого має нечітко виражений характер. Максимальні осадки — 26,0 мм, максимальне зміщення — 55 мм. Напрямок планових зміщень перпендикулярний до осі греблі. Це наочно видно на картограмі еліпсів зміщень (рис. 1).

З метою більш глибокого аналізу будемо розглядати осадки точок греблі як аддитивну модель, що складається з детермінованої (тренду) і випадкової компонент. Для виділення тренду застосуємо експоненціальне згладжування, що дає змогу враховувати розвиток процесу в часі. Рекурентна формула експоненціального згладжування має вигляд:

$$S(t_n) = \alpha [z(t_n) + \beta S(t_{n-1})], \quad (4)$$

де  $z(t_n)$  — спостереження в момент  $t_n$ ;  $S(t_n)$  — значення експоненціальної середньої в момент  $t_n$ ;  $\alpha$  — параметр згладжування.

Вираз (4) можна переписати таким чином:

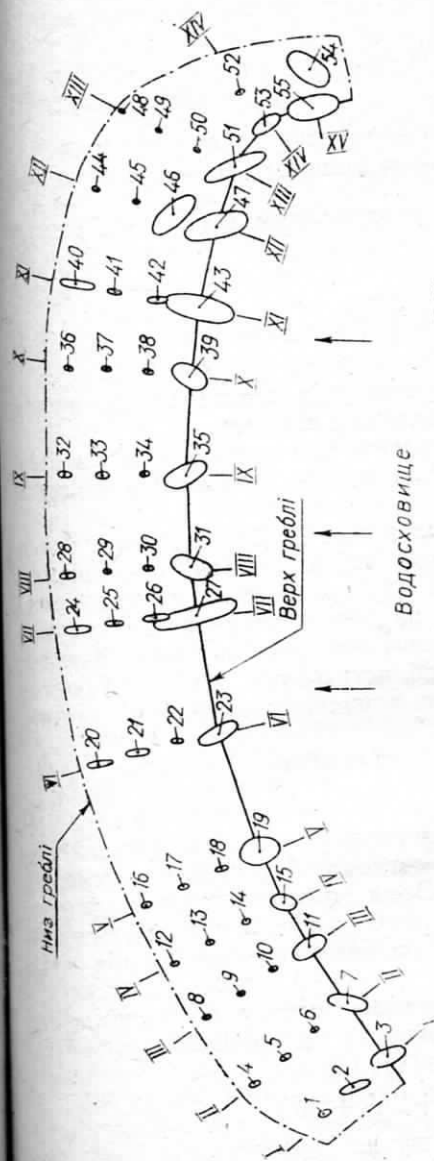


Рис. 1. Картограма еліпсів зміщень контрольних марок.

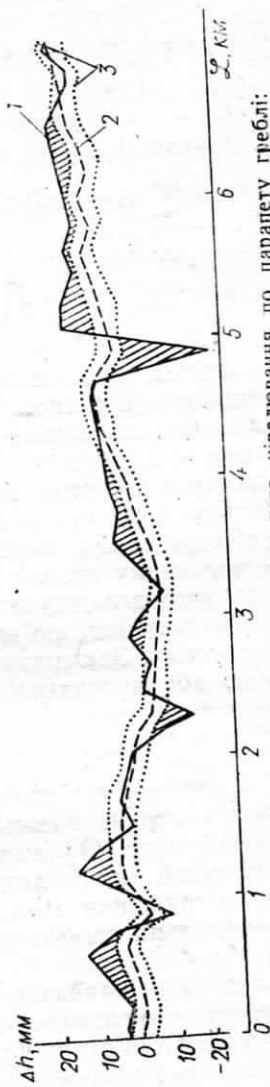


Рис. 2. Статистична обробка даних повторного вивчення по паралету греблі:

$$S(t_n) = S(t_{n-1}) + \alpha [z(t_n) - S(t_{n-1})]. \quad (5)$$

Якщо послідовно використовувати (5), то експоненційну середню  $S(t_n)$  можна виразити через минулі спостереження:

$$S(t_n) = \alpha \sum_{i=0}^{n-1} \beta^i z(t_{n-i}) + \beta S(t_0), \quad (6)$$

де  $S(t_0)$  — величина, що характеризує початкові умови.

Оскільки  $\beta < 1$ , то при  $n \rightarrow \infty$  величина  $\beta^n \rightarrow 0$ , а сума коефіцієнтів  $\alpha \sum_{i=0}^{n-1} \beta^i \rightarrow 1$ . Отже, з урахуванням попередніх спостережень одержимо

$$S(t_n) = \alpha \sum_{i=1}^{\infty} \beta^i z(t_{n-i}), \quad (7)$$

тобто оцінка є зваженою сумою всіх спостережень, причому ваги падають експоненційно залежно від часу.

Ефективність експоненціального згладжування залежить від величини  $\alpha$ . Емпірично встановлено, що у нашому випадку оптимальним є значення  $\alpha = 0,3$ .

На рис. 2 показана вихідна крива  $\Delta h(t)$ , одержана повторним нівелюванням контрольних точок (дюбелів) на парапеті верхового схилу греблі; крива (2) розрахована методом експоненціального згладжування і надійний інтервал (3) побудований з припущення, що випадкова складова має нормальний закон розподілу. Заштриховані області на рис. 2 відповідають випаданню або просадкам, тобто виявляють локальний характер осадочного процесу.

Після згладжування знаходимо різниці

$$X(t_n) = z(t_n) - S(t_n), \quad (8)$$

де  $S(t_n)$  — тренд ансамблю значень осадків. Одержаний у результаті процес  $\{X\}$  можна розглядати як квазістаціонарний. Спектральний аналіз даних  $\{X\}$  як тимчасових рядів підтверджує це припущення. Для ілюстрації на рис. 3, а, б даються АКФ та спектральна щільність, які розраховані за  $X_i$  для однієї марки.

Враховуючи характер осадочного процесу, близький до стаціонарного, обмежимося порівняльно простою прогнозною моделлю в просторі стану вигляду (4), (5)

$$X_k = \Phi X_{k-1} + B U_k + \Gamma W_k, \quad (9)$$

де  $W_k$  — випадковий процес (шум). Ідентифікація параметрів  $\Phi$  і  $B$  здійснюється на періоді основи  $k = 1, 2, \dots, N$  мінімізацією функціоналу

$$F(\Phi, B) = \sum^N (X_k - \bar{X}_{k/k-1})^2, \quad (10)$$

де  $\bar{X}_{k/k-1}$  — математичне сподівання рівняння (9). Ідентифікація шуму  $W_k$  виконується на основі аналізу кореляційної функції залишкових похибок. Ми скористалися лінійною моделлю авторегресії вигляду

$$W_k = \lambda W_{k-1} + \mu W_{k-2} + \zeta_k, \quad (11)$$

де  $\lambda, \mu$  — параметри, які оцінюємо.

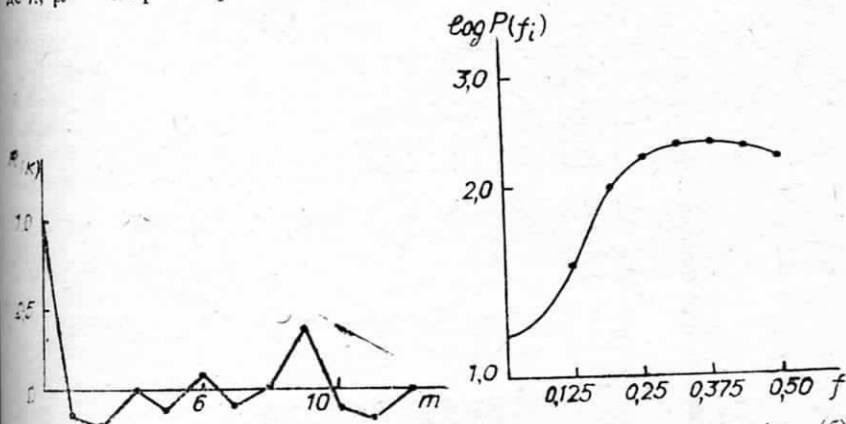


Рис. 3. Нормована автокореляційна функція (а) і спектральна щільність (б) зміщень контрольної марки МЗ-19.

З урахуванням тісної кореляції рівня води і осадків (коefficient кореляції 0,72) як вхідну дію вибрано рівень води. Розраховані за прогнозною моделлю значення очікуваних осадків  $\Delta$  зіставлені з емпіричними значеннями, отриманими в 14 і 15 циклах. Результати контрольного прогнозування вказують на надійність моделі для короткочасного прогнозу. В цьому випадку, як це видно з таблиці, помилки прогнозу становлять 0,5... 1,5 мм.

З виконаних досліджень випливає, що вивчення осадків і зміщень земляних гребель особливо великої довжини повинно бути комплексним. Ретельні геологічні та гідрогеологічні вишукування повинні бути вихідними для проведення наступних геодезичних спостережень.

Для греблі ХАЕС відсутні дані авторського контролю технології наміву греблі і результати лабораторних досліджень фізико-механічних властивостей ґрунтів. Результати виконаних нами інженерно-геологічних досліджень такі: 84% становить пісок фракції 0,1... 0,5 мм; 10% — фракції 0,5... 1,0 мм, кое-

Прогнозування процесу переміщення марки греблі

Гідроозчин 5  
Марка МЗ 19

K	$x_k, мм$	$U_k, мм$	$E_k$	$K_p [m]$	m	$X_{k+i/k}$	.....
1	-1,1	198,83	0	0	0		.....
2	-3	200,74	-1,533	,8549	0		.....
3	-1,5	200,73	,713	,0526	1		.....
4	-1	200,25	,244	,0631	2		.....
5	-1,6	199,69	,268	,1248	3		.....
6	2	199,52	1,29	-,3254	4		.....
7	-2,9	199,8	1,122	,1719	5		.....
8	-1	200,8	,165	-,0235	6		.....
9	-1,7	200,62	,217	,2166	7		.....
10	-2,2	200,78	,941	,0527	8		.....
11	-1	200,82	,988	-,1562	9		.....
12	-9	200,78	,93	-,1927	10		.....
13	-3	200,77	1,243	-,1588	11		.....
Фактичне значення							
Прогноз		200,95				-1,67	.....
Прогноз		201,26				-1,34	.....
Δ							
						-1	,67
						-3	-1,66

фіцієнт фільтрації близько 0,1 мм/с. Наведені дані мають якісний характер. Проте встановлення факту різнозернистості свідчить про можливе зниження об'ємної фільтраційної міцності, оскільки добре відомий вплив різнозернистості ґрунтів на їх властивості. Для більш коректної оцінки необхідне вивчення структури ґрунтів на мікрорівні з врахуванням можливої сегрегації.

Статистична обробка даних повторного нівелювання контрольних точок греблі методом експоненціального згладжування дозволяє досить надійно ототожнювати виміряні осадки з тенденцією динамічного процесу.

Лінійна модель [9] придатна для короткочасного (з упередженням в два-три цикли) прогнозу. Очевидно, для більш довготривалого прогнозування необхідно враховувати нелінійність осадочного процесу, мультиплікативність вхідних дій, просторовотимчасові закономірності зміни міцності ґрунту греблі.

1. Гольдин А. Л., Рассказов Л. Н. Проектирование грунтовых плотин. М., 1987.
2. Гуляев Ю. П. Алгоритм оценивания параметров динамической модели и прогнозирования процесса перемещений наблюдаемых точек сооружения // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. 1984. № 3. С. 26—32.
3. Инструкция по нивелированию I, II, III и IV классов. М., 1980.
4. Кильдишев Г. С., Френкель А. А. Анализ временных рядов и прогнозирование. М., 1973.
5. Киричков В. Н. Идентификация объектов систем управления технологическими системами. К., 1990.