

УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ДИНАМІЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ СТОХАСТИЧНОЇ СИСТЕМИ ВИЗНАЧЕННЯ ЗОН ЗАТОПЛЕННЯ ІЗ ВРАХУВАННЯМ ДАМБ ОБВАЛУВАННЯ

Здійснено моделювання із застосуванням аналізу змін характеристик впливу на оптимальне розміщення дамб обвалування. Удосконалено технологію динамічного моделювання за рахунок використання випадкових складових формування паводкового стоку. Об'єктом розгляду є метод побудови моделей поведінки стохастичних систем.

Done using simulation analysis of changes in characteristics influence the optimal placement of dams diking. Enhanced dynamic simulation through the use of random elements forming flood runoff. Under review is a method for constructing behavior models of stochastic systems.

1. Вступ

Як правило, виділяють такі основні задачі побудови динаміко-стохастичних моделей стоку, як облік в динамічних не випадкових моделях процесів стохастичної просторової змінності гідрометеорологічної дії на водозбір і його характеристик, використання в якості входу детермінованих моделей статистичного опису гідрометеорологічної дії на водозборі та облік помилок вихідної інформації в детермінованих моделях. Однак, результатом таких моделей можуть бути усереднені найбільш ймовірні характеристики водного режиму або їх статистичний розподіл. Вигляд статистичних зв'язків і структура динаміко-стохастичної моделі повинні мінятися в залежності від екогеографічних умов, тому їх абстракція повинна проводитися в різних гідроекологічних системах.

В цілому, із-за труднощів відміни між обсягом теоретичних знань про формування стоку та емпіричними даними застосування методів динаміко-стохастичного моделювання не здійснюється. Однак, використання гносеологічних моделей, що будуються на пізнанні тільки фізичних закономірностей не враховують випадковість факторів впливу, що є джерелом стихійних явищ затоплення територій. Тому мною запропонована динамічна модель із застосуванням аналізу змін характеристик впливу на оптимальне розміщення дамб обвалування саме із врахуванням випадкових складових.

2. Постановка задачі

В задачі досліджень входило:

- здійснити аналіз факторів впливу формування ходу стоку під час дощових павод-

- ків на водозборах гідроекологічних систем і річок, у заплавах яких вони споруджені;
- опрацювати досвід застосування математичних моделей дощового та снігодощового стоку для прогнозування паводків, що надасть можливість наукового обґрунтування розташування дамб відносно русла річки;
- удосконалити технологію побудови динамічних моделей стохастичних систем;
- удосконалити технологію проілюструвати прикладом.

3. Виклад основного матеріалу дослідження

Оскільки теорія ймовірності та статистичні методи часто слугують єдиним шляхом кількісного оцінювання характеристик метеорологічних і гідрологічних явищ вони застосовуються в гідрометеорологічних дослідженнях при вирішенні багатьох завдань. Зокрема, гідрометеорологічні процеси за своєю сутністю багатofакторні, тому математичний опис їх результатів можливий лише статистичними методами. Однак, достовірність визначення характерних рівнів води в річках шляхом опрацювання даних їхніх багаторічних спостережень методами математичної статистики не завжди може бути забезпечена через нестабільність русла річки не лише у створі поста, але й на річковій ділянці поблизу.

Класифікацією та алгоритмізацією задач даного характеру займався Гнатієнко Г.М. Дослідження Гермейєра і Байєса-Лапласа описують критерії експертного оцінювання, що використовуються у випадку ідеалізованих практичних

ситуацій з метою вивчення внутрішніх зв'язків оцінювання даних.

Теоретично дана задача для прогнозування досліджена досить обширно, як у неперервному так і у дискретному варіантах. Відповідними алгоритмами екстраполяції є форми фільтрів Вінера, Калмана-Б'юсі і різницевих рівнянь авторегресії. Серед екстраполяційних моделей важливе місце займають трендові моделі розвитку. Метою створення таких моделей є прогнозування показників, що формуються під впливом великої кількості чинників, інформація з яких частково може бути відсутньою. Емпіричні ряди динаміки несуть на собі вплив не тільки основних, але і другорядних факторів, що згладжують головну тенденцію у зміні досліджуваного показника. Хід зміни шуканого пов'язують не тільки з чинниками, а й з часом.

Дана методологія є недостатньо опрацьованою у вирішенні проблеми затоплення території Закарпаття з точки зору прогнозування випадкової складової моделювання процесів формування стоку в екстремальних ситуаціях паводку. Не завжди дослідження базуються на розрахунках засобами програмного забезпечення ЕОМ [1, 2], що є необхідним для більш точного і термінового вирішення ситуації. Варто, також, зупинитися на зручності та ефективності інтерполяції, що дає змогу визначити граничні умови, описати залежності з розривами функцій та їх похідні, правильно організувати введення та виведення даних при математичному моделюванні, виконати аналіз одержаних результатів, порівняти результати з експериментальними даними. Зокрема, вартою уваги, і ділянкою, що потребує розробки заходів для покращення пропуску критичних рівнів води під час паводків басейну р. Боржави, є місцевість території від вузькоколіїного залізничного мосту біля с. Шаланки до автодорожнього моста на ділянці автодороги Заріччя-Вільхівка. В подальшому наші дослідження спиратимуться на дану територію.

3.1. Врахування взаємозв'язку та впливу метеорологічних факторів на формування стоку

Нехай, у результаті вишукувань отримали набір даних

$$x_1^{(n)}, x_2^{(n)}, \dots, x_i^{(n)}, y_1^{(n)}, y_2^{(n)}, \dots, y_j^{(n)}, n = 1, 2, \dots, N.$$

За якими необхідно підрахувати значення q_1, q_2, \dots, q_k , де x_i і y_j пов'язані із шуканими q_1, q_2, \dots, q_k залежністю

$$y_m^n = \varphi_m(q_1, q_2, \dots, q_k; x_1^{(n)}, x_2^{(n)}, \dots, x_i^{(n)}).$$

Результат кожного окремого процесу є випадковою величиною з деякою густиною ймовірності $f(y_1, y_2, \dots, y_m)$.

Для виконання гідрологічних розрахунків при проектуванні та експлуатації гідромеліоративних систем необхідно виявити зокрема залежність між опадами і стоком на даній території, використовуючи інші фактори як параметри.

Згідно рекомендацій Хойта, цикл стоку ділиться на наступні фази:

- період перед початком стокоформуєвих опадів;
- період перед закінченням зливи або зливової частини тривалого дощу;
- період після закінчення зливового дощу, але до вичерпування запасів поверхневого затримання і запасів, накопичених в руслах.

Обчислення зволоження водозбору до початку паводку, який виражається через дефіцит вологості, виконується безперервно, починаючи з кінця попереднього паводку, або ж з весняного періоду, коли вологість ґрунту може бути прийнята близькою до максимально можливої. Американські гідрологи широко використовують характеристику початкового зволоження індексу затримання води [3]:

$$I_d = [P - Q] * K^t,$$

де P – опади, мм;

Q – витрата води, м³/с;

K – параметр;

t – розрахунковий інтервал, год.

Ними було показано, що цей показник чисельно близький до кількості вологи у верхньому тридцяти сантиметровому шарі ґрунту.

У випадку безперервності випадання опадів:

$$I_a(t) = \int_0^t [P(\tau) - Q(\tau)] * K^{t-\tau} d\tau$$

В.П. Петрук, аналізуючи формули, пише, що в даному випадку зробив неявне припущення, що за кожен день випаровується $(1-K)$ – та частина вологи. Таким чином, запас води на водозборі можна буде розрахувати більш точніше, якщо підрахувати хід випаровування та інфільтрації.

Припустимо, що водозбір володіє деякою постійно максимальною водоутримуючою ємкістю, яка повністю заповнена, коли опади витрачаються лише на випаровування і стік, тобто коли можна знехтувати інфільтрацією. Такі періоди спостерігаються після сходу снігу, чи

після сильного дощу. Зміни запасів води в цій ємкості (R_b) за одиницю часу визначаються співвідношенням опадів, випаровування і стоку [3]:

$$R_b(t) = \int_{t_0}^t [P(\tau) - E(\tau) - Q(\tau)] * K(t - \tau) \partial \tau$$

де $K(t - \tau)$ – функція впливу, яка відображає інерційність зміни запасів води в басейні. Якщо $R_b(t) > 0$ то йде процес заповнення водоутримуючої ємкості, при $R_b(t) < 0$ водоутримуюча ємкість звільняється від води. Ту частину водоутримуючої ємкості, яка звільняється від вологи перед випаданням розрахункового дощу можна обчислити таким чином. Спочатку знаходиться позитивна хвиля $R_b(t) > 0$, а потім обчислюється інтеграл:

$$W_0 = - \int_{t_0}^T R_d(t) \partial t$$

де T – початок розрахункового дощу,

t_0 – момент часу, який при $R_b(t)$ стає рівним нулю після максимальної позитивної хвилі.

Тривалість паводку – це інтервал часу від початку хвилі зростання паводку до досягнення припущеного нульового значення складової паводкового стоку. Тривалість паводку можна виразити у вигляді:

$$T_n = t_d + t_{cm},$$

де t_d – тривалість дощу,

t_{cm} – час стікання води до замикаючого створу.

Ця величина з часом, необхідним для переміщення об'єму води з найбільш віддаленої точки водозбору до замикаючого створу. Для русел величина t_{cm} – час стікання води замикаючого створу, обчислюється за формулами Шезі.

Під час другої фази стоку, в початковий період дощу, додатковим до стоку є лише та частина опадів, яка випадає на поверхню річки і каналів. Частина опадів перехоплюється рослинами (інтерполяція) і поступово повертається в атмосферу у вигляді випаровування. Більша частина дощу, яка досягає поверхні землі, частково проходить крізь ґрунт у вигляді фільтрації, заповнюючи ґрунтову водоутримуючу ємкість, частково затримується у вигляді запасів у депресіях. В цей час схиловий стік відбувається лише з невеликої частини басейну, а також із крутих схилів.

Значення перехоплення рослинами дощу в процесі формування високих паводків порівняно невелике. Проте на територіях заселених,

або покритих іншими видами густої рослинності існує перехоплення дощу різними видами рослин, яке визначається за формулою:

$$V_t = S_i + C_p * E_a * t_d,$$

де S_i – шар затримання на одиницю проекції площі,

C_p – відношення поверхні рослинного покриття до площі її горизонтальної проекції,

E_a – інтенсивність випаровування на одиницю площі.

Однак через нестачу даних про перехоплення, в модель призначену для обчислення динаміки стокоутворення і прогнозування паводків на водозборах меліоративних систем ми наклали емпіричні залежності для визначення величини перехоплення в різних умовах:

$$I_{nep}(t) = \begin{cases} a + b\bar{P}(t)^n, I_{noch} = 0, q_1 = 0; \\ 0, I_{noch} > 0, q_1 > 0, \end{cases}$$

де a, b, n – емпіричні параметри, значення яких наведені в таблиці,

h – висота рослин в метрах.

Середнє значення перехоплення по водозбору визначається як сума добутків обчислених величин перехоплення на відповідні коефіцієнти пористості водозбору кожним видом рослинності. Проте після повного змочування рослинного покриття подальша інтерцепція дорівнювала б нулю, якби не було значного випаровування з великої площі поверхні листя рослин. Звідси витікає, що після завершення змочування листя кількість води, яка досягає поверхні ґрунту, дорівнює кількості опадів мінус випаровування з поверхні рослинного покриття. Тому в моделі розрахунок величини інтерцепції ведеться лише на початкових стадіях дощу до моменту коли I_{noch} (початкове значення інтенсивності інфільтрації) або q_1 (інтенсивність поверхневого стоку) стане > 0 .

Після тривалого випадання дощу, об'єм перехоплення рослинами заповнюється, решта води стікає на землю. Заповнюються всі поверхневі депресії і ємкості перехоплення, дефіцит вологості ґрунту погашається на значну глибину, а інтенсивність інфільтрації наближається до мінімуму. Настає третя фаза циклу стоку. Одночасно на непроникних і частково проникних поверхнях водозбору утворюється тонкий шар води – плівка поверхневого затримання. Накопичуючись, вода збирається в невеликі струмки, які дають початок силовому стоку в малі водотоки, зливаючись потім в більш крупних потоках річок. Русловий стік набуває зв'язку з інтенсивністю опадів, за виключен-

ням частини вологи, яка йде на випаровування. Грунтовий стік збільшує витрати води в річці, а запаси ґрунтових вод знову поповнюються.

Інтенсивність поверхневого стоку розраховується в моделі згідно рекомендацій Попова після внесення деяких змін:

Після закінчення опадів припиняється схиловий стік і витрата в річці формується за рахунок запасів води накопичених в товщі водозбору (ґрунтових вод) та руслової мережі, це настає четверта фаза стоку. Збільшується інтенсивність випаровування, починається транспірація рослинами, вода депресій продовжує проникати в ґрунт, а гравітаційна вода в межах зони аерації продовжує поповнювати запаси ґрунтових вод. Величина ґрунтового стоку, головним чином, залежить від коефіцієнта фільтрації та дренажності території, а стік по всій товщі водоносного шару досягається лише після заповнення водоутримуючої ємкості за рахунок дії складової сили тяжіння, направленої вздовж водоупору.

Інтенсивність ґрунтового стоку в моделі розраховується залежністю [3]:

$$q_2(t) = \begin{cases} \frac{(W_m - 0.5[d(t) - d(t - \nabla t)])}{k_3}, & q_2(t) \leq \bar{P}(t) - E(t) - h(t) - i_0; \\ \bar{P}(t) - E(t) - h(t) + i_0, & q_2(t) < \bar{P}(t) - E(t) - h(t) - i_0. \end{cases}$$

Для використання методики розрахунку і підвищення точності розрахунків з метою прогнозування об'єму та ходу стоку паводків на конкретних водозборах, варто розділити територію на певну кількість стокоформуєчих часткових площ. Модель надає можливість визначити числові значення параметрів та врахувати закономірності переміщення паводкових хвиль і їх інтерференцію по кожній конкретній частковій площі водозбору.

3.2. Моделювання ситуації паводку із урахуванням дамб обвалування

Ще в 1959 р. В.Д. Комаров в області гідравлічних розрахунків запропонував використовувати для дослідження весняного стоку криві розподілу висоти стоку. Облік ефектів усереднення по площі за допомогою теоретичних кривих розподілу параметрів водозбору і вхідних величин у концептуальній моделі дощового стоку здійснювався В.І. Корнем і Л.С. Кучмен-том.

Пропозиції по обліку просторових розподілів факторів, які визначають талий стік у моделях

із зосередженими параметрами зробив В.А. Румянцев. Е.М. Гусев дослідив вплив на формування дощового стоку на схилі статистичної змінності і автокореляції коефіцієнта фільтрації. Для апроксимації статистичного розподілу в точці використовувався двопараметричний гамма розподіл. Сміт і Хебберт, вивчаючи вплив просторової зміни гідрографічних характеристик на стік, припустили, що коефіцієнт фільтрації розподілений по логарифмічно-нормальному закону.

Із-за труднощів відміни між обсягом теоретичних знань про формування стоку та емпіричними даними застосування таких методів було призупинено. Однак, використання ґносеологічних моделей, що будуються на пізнанні тільки фізичних закономірностей не враховують випадковості факторів впливу, що є джерелом стихійних явищ затоплення територій. Тому я зупинилася на моделюванні процесу формування стоку саме із врахуванням стохастичних складових.

Нехай, стохастичними складовими характеристиками водозбору A_{ij} , де i і j – номери вузлів просторової мережі, розподілені по нормальному закону із середнім μ_A і середньоквадратичним відхиленням ν_A і утворюють однорідні і ізотропні поля з автокореляційною функцією.

Нехай, у результаті експерименту отримали набір даних

$$x_1^{(n)}, x_2^{(n)}, \dots, x_i^{(n)}, y_1^{(n)}, y_2^{(n)}, \dots, y_j^{(n)}, n = 1, 2, \dots, N.$$

За якими необхідно підрахувати значення q_1, q_2, \dots, q_k , x_i і y_j пов'язані із шуканими q_1, q_2, \dots, q_k залежністю

$$y_m^n = \varphi_m(q_1, q_2, \dots, q_k; x_1^{(n)}, x_2^{(n)}, \dots, x_i^{(n)}).$$

Результат кожного окремого процесу є випадковою величиною з деякою густиною ймовірності $f(y_1, y_2, \dots, y_m)$.

Проблема зводиться до розв'язку задачі оптимізації з використанням методів екстремального оцінювання, яка передбачає відшукування

$$y_i = f_i(x) \rightarrow \max$$

Розв'язок такої задачі слідує із завдання деякого правила вибору на множині ефективних об'єктів єдиного розв'язку, який вирішується формально і базується на застосуванні евристик і умов раціональності.

Для опису використовуватимемо символічне представлення у вигляді кортежу (A, S, R, E, C, P) , де

A – множина об'єктів, S – множина обмежень, R – множина принципів оптимальності, E – множина формальних характеристик, C – множина цілей, які стоять перед дослідником, P – система переваг.

Для кожного параметра можуть бути відомі вагові коефіцієнти їх відносної важливості $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_m$, важливо задати напрями оптимізації параметрів. Для кількісних (абсолютних, відносних чи нормованих) використовується верхня, середня (найімовірніша, найприйнятніша чи бажана) та нижня оцінки. Для підрахунку точкових значень параметрів здійснюється обчислення одним із способів.

Множину S – обмежень задамо

$$s_{*l} \leq s_l(a^1, a^2, \dots, a^m) \leq s_l^*, l \in \{1, \dots, l_0\},$$

де s_l – довільні дійснозначні функції дискретного аргументу, $a^s, s \in J$ – параметри об'єктів, s_{*l}, s_l^* – дійсні числа, l_0 – кількість обмежень.

Для розв'язання проблеми матимемо стохастичні складові характеристик водозбору a_{ij} , де i і j – номери вузлів просторової мережі, розподілені по нормальному закону із середнім μ_A і середньоквадратичним відхиленням ν_A і утворюють однорідні і ізотропні поля з автокореляційною функцією [3]:

$$f_A(l) = \exp(-\alpha_A |l|),$$

де l – відстань між двома точками поля; α_A – радіус кореляції.

Величина задаватиметься $\hat{a}_{ij} = \mu_A + e_{ij} \nu_A$,

де e_{ij} – випадковий процес із середнім, рівним нулю, середньоквадратичним відхиленням, рівним одиниці, і радіусом кореляції α_A .

Величина e_{ij} моделюється методом Монте-Карло по формулах

$$e_{ij} = (2/n)^{1/2} \sum_{m=1}^N \cos(w_m (x_i \sin \gamma_m + y_j \cos \gamma_m + \varphi_m)),$$

$$w_m = \alpha_A \left(\left(\frac{1}{1 - G(w_m)} \right)^2 - 1 \right)^{1/2},$$

де $N = 50$; γ_b, φ_b – випадкові величини, рівномірно розподілені на відрізок $[0, 2\pi]$;

$G(w_m)$ – спеціальна випадкова функція з діапазоном зміни 0-1.

Відмітки поверхні водозбору z_{ij} задаватимуться за допомогою двовимірної просторової мережі у вигляді [106]

$$z_{ij} = I * y_n \left(1 - \left(\frac{y_j - y_n}{y_n} \right)^2 \right)^{1/2} + e_{ij} \nu_z,$$

де i і j – номери вузлів мережі вздовж осей x і y ; I – середній нахил між $y = 0$ і $y = y_n$; y_n – ширина водозбору продовж вісі y (величина y_n приймається сталою для усіх x); ν_z – середньоквадратична зміна стохастичної складової величини z_{ij} .

Рух води по поверхні водозбору визначався шляхом зміщення поступання на час добігання. Величину часу добігання віднайдемо по формулі:

$$t_{ij} = g_T y_j + h_T x_i + e_{ij} \nu_T,$$

де g_T, h_T – параметри, які визначаються по заданих швидкостях нахилу і руслового стікання;

ν_T – середньоквадратична зміна стохастичної частини.

Розрахунок інфільтрації води у ґрунт здійснимо по формулі

$$c_{ij} = 0,3(2k_{ij} b_{ij} (n_{ij} - \theta_{ij}^0))^{1/2},$$

отриманої із рівняння дифузії вологи при деяких додаткових припущеннях. Тут k_{ij} – коефіцієнт фільтрації; n_{ij} – пористість;

$$b_{ij} = \frac{1}{k_{ij}} \int_{\theta^0}^{n_{ij}} d_{ij}(\theta) d\theta,$$

де θ^0 – початкова волога; $d_{ij}(\theta)$ – коефіцієнт дифузії.

Поля інтенсивності опадів моделюємо [Брас і Родрігес-Ітурбе, 1979] враховуючи просторову кореляцію опадів і швидкість ливню. Для суми опадів за дощ H_r . Нехай, величини T_r, H_r , а також продовжуваність не дощових періодів τ_p – розподілені по експоненціальному закону.

Швидкість ливню моделюємо по нормальному розподілі $T(\mu_u, \nu_u)$, де μ_u – середнє значення швидкості u_r , а σ_u – її середньоквадратичне відхилення.

По величинах τ_p, c_{ij} підраховуємо зміни середнього рівня ґрунтових вод z'_{ij} . Потужність зони аерації визначалася як

$$z''_{ij} = z_{ij} - z'_{ij}.$$

Початковий розподіл вологи задамо залежністю

$$\theta_{ij}^0 = n_{ij} (\exp(-d_1 Z''_{ij}) \exp(-d_2 (\tau_p - \mu_\tau)) + e_{ij} \sigma_\theta),$$

де d_1, d_2 – коефіцієнти;

σ_θ – середньоквадратичне відхилення стохастичної складової вологи ґрунту.

Початковий дефіцит вологи визначався як

$$s_{ij}^0 = \Delta x \Delta y z_{ij}'' (n_{ij} - \theta_{ij}^0).$$

Створення нормального випадкового процесу здійснила генерацією звичайним способом вектора незалежних випадкових чисел і побудувала інтерполяційну залежність у проміжках між ними.

Витрати визначимо [3]:

$$Q^m = \sum_{i=1}^{N_x} \sum_{j=1}^{N_y} r_{ij}^{m-m'},$$

де $m' = t_{ij} / \Delta t$ (Δt - крок часу).

На меліоративних системах у період підйому паводку зменшуються сумарні експлуатаційні витрати, однак зменшується акумулююча ємкість і збільшується ймовірність втрат урожаїв від перезволоження та затоплення сільськогосподарських угідь. Оптимальне рішення наведеної задачі може бути знайдено при співставленні різних варіантів віддалі між дамбами з урахуванням їх взаємозв'язку з динамікою паводку, продуктивністю культур і витратами на експлуатацію.

4. Висновки

Виконано аналіз значних за обсягом натурних даних стосовно процесів, умов та особливостей формування паводків і весняного стоку води на водозборах досліджуваного регіону із урахуванням розташування дамб відносно русла річки. Вперше запропоновані для реалізації методичні рішення удосконалення методу динамічного моделювання щодо процесу поведінки стохастичних систем. Результати досліджень частково впроваджені при розробці лівобережної дамби захисту території с. В. Ком'яти басейну р. Боржава.

Наукові засади та методичні розрахунки можуть бути використані проектними інститутами. Узагальнення отриманих результатів дозволить удосконалити розрахунок визначення зон можливих затоплень із використанням існуючих математичних моделей, розробити елементи комплексного програмного забезпечення автоматизації інформаційно-вимірювальної системи із використанням можливості оптимізації режиму роботи гідроекологічної системи на основі наукового обґрунтування розташування дамб відносно русла річки.

Список літератури

1. Сапсай Г.І., Чіпак В.П., Мельник Т.П. Елементи автоматизації управління водними ресурсами в басейні ріки Тиса. // Вісник НУВГП. Збірник наукових праць. – Вип.. 4(36). – Рівне. :НУВГП, 2006. – С. 102-109.
2. Сапсай Г.І., Чіпак В.П., Мельник Т.П. Автоматизація організації даних управління водними ресурсами в басейні ріки Тиса. // Вісник НУВГП. Збірник наукових праць. – Вип.. 4(36). – Рівне. :НУВГП, 2006. – С. 95-102.
3. Чіпак В.П., Мельник Т.П. Система протипаводкових заходів у басейні р.Боржава. – Рівне: Волинські береги, 2008. – 202 с.