

МАТЕМАТИЧНИЙ АПАРАТ ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ АНОМАЛЬНИХ ПРИПЛИВІВ (ЦУНАМІ)

© Шулькевич Т. В., Селін Ю. М., 2016

Описано можливий підхід щодо моделювання екологічних процесів, а саме аномальних припливів (цунамі). Запропонований математичний апарат на основі статистичних методів містить приховані моделі Маркова, лінгвістичне моделювання та метод подібних траєкторій.

Ключові слова: екологічні процеси, аномальні припливи, цунамі, моделювання, математичний апарат, приховані марковські моделі, лінгвістичне моделювання, метод подібних траєкторій.

The paper contains the description of the feasible approach to modeling of environmental processes, namely abnormal tidal (tsunami). The suggested mathematical apparatus is based on the statistical methods and comprises hidden Markov models, linguistic modeling and similar trajectories method.

Key words: environmental processes, abnormal tidal, tsunami, modeling, mathematical apparatus, hidden Markov models, linguistic modeling, linguistic modeling, similar trajectories method.

Вступ. Загальна постановка проблеми

Цунамі – хвилі завдовжки понад 500 м, які утворюються в морі чи в океані зазвичай внаслідок землетрусів (падіння астероїду тощо) і охоплюють всю товщу води [1]. На глибокій воді цунамі поширюється зі швидкістю кількисот кілометрів на годину і зазнає незначних втрат енергії.

Головна відмінність цунамі від інших видів хвиль полягає у тому, що рухається вся товща води, а не лише приповерхневий шар. В морі на значній глибині цунамі не становлять загрози для судноплавства, їх можна навіть не помітити. Біля берега, коли глибина поступово зменшується, цунамі уповільнюється, а висота хвилі зростає: вона перетворюється на рухому стіну води. Під час виходу на мілину біля берега її висота може сягнути десятків метрів. Крім того, хвиля, що йде під кутом до берега, уповільнюється нерівномірно і має тенденцію розгортатися до берега.

Причиною більшості цунамі є підводний землетрус, під час якого відбувається зсув (підйом чи опускання) ділянки морського дна. Зазвичай виникає від трьох до п'яти хвиль, друга або третя найсильніші. Саме таке цунамі виникло під час землетрусу в Індонезії в 2004 р. і саме воно спричинило більшу частину жертв і руйнувань (рис. 1) [1]. Крім того, причиною цунамі може бути зсув (обвал) великої кількості ґрунту, гірських порід безпосередньо в океан. Найвідомішим прикладом такого цунамі є гігантська хвиля у затоці Літуя (Аляска, США), що виникла 9 липня 1958 року. Внаслідок землетрусу льодовик Літуя обвалився у затоку з висоти 900 метрів і викликав на протилежному кінці вузької затоки хвилю заввишки 500 (п'ятсот!) метрів. Не менш небезпечними є підводні зсуви у дельтах річок з високими накопиченнями відкладень [2].

Вулканічні виверження створюють близько 5 % всіх цунамі. Великі підводні виверження створюють такий самий ефект, як і землетруси. А під час потужних вулканічних вибухів довгі хвилі утворюються, коли вода заповнює кальдери (порожнини, що залишилися від виверженого матеріалу). Класичний приклад – цунамі, що виникло під час виверження вулкану Кракатау 1883 року. В околицях Яви і Суматри висота хвиль сягала 35–40 метрів, цунамі спостерігалось на Цейлоні, біля Південного берега Африки і на мисі Горн (Південна Америка). Причому поблизу

останнього майже одночасно спостерігалось дві хвилі: одна огинала земну кулю зі сходу на захід, а інша – у протилежному напрямку. Різкі зміни повітряного тиску або швидкі пересування аномалій атмосферного тиску можуть спричинити метеоцунамі [3]. Такі типи хвиль є загальними для всього світу, але відомі здебільшого під своїми локальними (місцевими) назвами: Абікі (Японія), кат. Pissara (Балеарські острови) тощо.

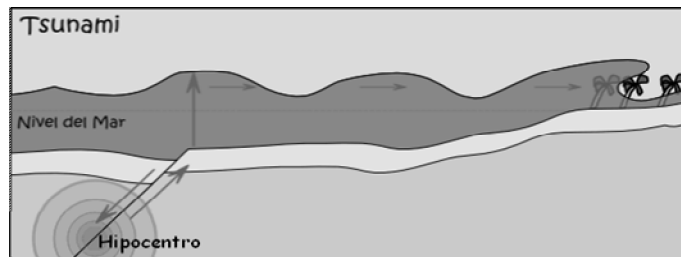


Рис. 1. Утворення цунамі

Цунамі можуть виникнути також від потужних підводних або надводних вибухів, але вони здебільшого мають локальний характер. Щоб спричинити справжнє океанське цунамі, потужності наявної ядерної або термоядерної зброї не достатньо. Хоча одночасний вибух кількох потужних водневих бомб, розташованих уздовж деякої лінії на дні океану, теоретично може спричинити цунамі. Проте випробування ядерної зброї заборонено міжнародними договорами.

Падіння значного метеорита (астероїда або комети) також може призвести до цунамі. А оскільки кінетична енергія такого тіла (через його швидкість) може перевищувати енергію, що вивільняється під час найпотужніших землетрусів, то падіння на поверхню океану може призвести до велетенського цунамі, що біля берегів матиме висоту понад 100 м.

Хвилі цунамі мають надзвичайно довгий період (від двох хвилин до години) та, відповідно, велику довжину (десятки або сотні кілометрів), тоді як звичайні хвилі, створені вітром, мають період до 10 секунд та довжину хвилі до 150 м. Оскільки довжина хвилі цунамі набагато більша за глибину водоймища, то до розповсюдження таких хвиль можна застосувати так зване наближення міліни: хвиля на міліні рухається із швидкістю, що пропорційна квадратному кореневі від глибини водоймища, де прискорення вільного падіння (9.8 м/с^2), а h – глибина. Наприклад, на глибині 4000 м швидкість становитиме близько 200 м/с (712 км/год), а на глибині 40 м – лише 20 м/с (71 км/год). Найбільша швидкість руху цунамі, яку вдалося виміряти, становила 1000 км/год. На ілюстрації цунамі 2004 року показано, як профіль дна Індійського океану впливає на розповсюдження хвиль.

Енергія хвилі цунамі є постійною величиною, що залежить від її висоти та швидкості.

Хвиля цунамі висотою кілька метрів має набагато сильнішу руйнівну дію, ніж штормові хвилі тієї самої висоти. Причин, що викликають такі наслідки, декілька.

Під час шторму рухається лише приповерхневий шар води; під час цунамі рухається вся товща. Отже, під час цунамі на берег вихлюпується набагато більше води.

Швидкість цунамі набагато більша за швидкість вітрових хвиль, навіть біля берега. Отже, кінетична енергія набагато більша.

Під час шторму хвилі збільшуються поступово, що надає можливість відійти у безпечне місце. До того ж штормові попередження надають можливість вжити заходів безпеки, евакуюватися. Цунамі ж приходить раптово: системи попередження цунамі є не всюди і працюють вони не завжди.

Цунамі зазвичай приходить кількома хвилями. Перша хвиля не найбільша, але вона змочує поверхню суходолу і зменшує опір для наступних; інтервал між хвилями може становити від кількох хвилин до години.

Шкала інтенсивності цунамі:

1 бал – дуже слабка. Хвиля реєструється лише приладами, що вимірюють зміну висоти рівня моря.

2 – слабка. Може затопити пласке узбережжя. Її помічають тільки досвідчені рибалки та моряки.

3 – середньої сили. Зазначається всіма спостерігачами. Пласкі узбережжя затоплено, легкі судна може бути викинуто на берег. У гирлах річок течія може змінитись на зворотню. Портові споруди зазнають невеликих руйнувань.

4 – сильна. Узбережжя затоплено, прибережні споруди пошкоджено. Великі вітрильники і невеликі моторні судна викинуто на суходіл, а потім знову змито в море. Береги засмічено уламками і сміттям.

5 – дуже сильна. Приморські території затоплено. Пошкоджено моли. Великі судна викинуто на берег. Значні збитки у внутрішній частині узбережжя. Все навкруги вкрито уламками. У гирлах річок високі штормові нагони. Людські жертви.

6 – катастрофічне цунамі. Повне спустошення узбережжя та прилеглої території. Суходіл затоплено на значну відстань. Пошкоджено найбільші кораблі. Значна кількість жертв.

Системи попередження цунамі.

Цунамі можуть призводити до значних руйнувань на узбережжі та островах, навіть на відстанях, де початковий землетрус реєструється лише приладами.

Найбільшу загрозу цунамі становлять для місць на узбережжі океанів неподалік сейсмічних зон: о. Гаїті, Японія, Філіппіни. Понад 80 % усіх цунамі реєструються на периферії Тихого океану.

Системи попередження цунамі будуються здебільшого на опрацюванні сейсмічної інформації: якщо землетрус має магнітуду понад 7 і його епіцентр розташовується під водою, подається попередження про цунамі. Залежно від регіону та заселеності узбережжя сигнали можуть відрізнятися.

Суттєвим моментом системи попередження є розповсюдження інформації серед населення. Дуже важливо, щоб мешканці узбережжя уявляли, яку загрозу становить цунамі. Наприклад, у Японії існують численні освітні програми про природні катастрофи, а в Індонезії здебільшого не знають про цунамі, що й зумовило велику кількість жертв попри те, що у мешканців цієї країни мав би бути відповідний досвід.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

З огляду літератури [4, 5] можна виділити три основні напрямки і, відповідно, три методологічні підходи до математичного моделювання динаміки екологічно небезпечних процесів різнотипної природи – напрямок, що складається із динаміко-чисельних підходів, які ґрунтуються на числових методах розв'язання різних видів диференціальних рівнянь, що описують фундаментальні фізичні залежності, а також атмосферних і гідродинамічних процесів. Вони орієнтовані на розв'язання таких основних задач найважливіших динамічних просторово-часових закономірностей поточних природних процесів:

- виявлення поточних просторово-часових взаємозв'язків між різними атмосферними процесами в динаміці спостережень;
- формування моделей природних процесів для прогнозування динаміки їхнього розвитку.

Другий напрямок, що містить емпіричні динаміко-статистичні підходи, які ґрунтуються на використанні багаторічних статистичних даних натурних вимірів, має міжнародна система аналізу і прогнозу складників екологічної системи. Вони орієнтовані на виявлення фундаментальних просторово-часових закономірностей, характерних для атмосферних процесів протягом десятиліть. Основною метою цих підходів є, власне кажучи, установлення на основі багаторічних статистичних даних глибоких просторово-часових кореляційних зв'язків між різними природними процесами. Залежно від цілей дослідження будувати математичний апарат аналізу динаміки екологічно небезпечних процесів доцільно на основі ідей як динаміко-числових, так і динаміко-статистичних підходів, але з урахуванням специфічних особливостей і властивостей цих процесів.

Третій клас процесів, які неможливо моделювати за допомогою динаміко-числових методів, через відсутність певної періодичності (добової, місячної, річної або іншої сталої періодичності) важко описувати за допомогою емпірико-статистичних методів. Тож актуальною є задача розроб-

лення аналізу протходження таких процесів, а також методів прогнозування таких процесів для системи інформаційного забезпечення управління і контролю екологічної обстановки.

Отже, за результатами аналізу можна зробити висновок, що екологічно небезпечні процеси відрізняються складними взаємозв'язками, взаємозалежностями, взаємодіями різноманітних факторів і причин. Вони мають такі характерні властивості й особливості:

- різнорідність і різнотипність причин і факторів, а також дій, які приводять до їхнього виникнення;
- просторова розподіленість умов виникнення, невизначеність у часі і просторі динаміки розвитку і регіонів їхнього впливу на екосередовище;
- нестационарність властивостей і невизначеність їхніх характеристик.

Ці властивості й особливості визначають практичну необхідність дослідження всього різноманіття властивостей, взаємозв'язків, взаємодій, взаємозалежностей різнорідних факторів і причин екологічно небезпечних процесів на основі єдиного системного підходу з позиції досягнення єдиної визначальної мети керування і контролю екологічної обстановки – своєчасного запобігання і (або) мінімізації небажаних наслідків їхньої дії. Разом з тим аналіз показує, що сьогодні різні види природних і техногенних екологічних процесів, їх причини, протікання, наслідки й область дії досліджуються окремо, без урахування взаємозв'язків, взаємозалежностей, взаємодії.

За такого підходу не беруть до уваги деяких найважливіших факторів, які впливають на процеси, що відбуваються, рівень їхнього небажаного впливу, можливість і результативність запобігання йому.

Формулювання мети

Надамо можливий математичний апарат, який, на думку авторів, можна використовувати для прогнозування цунамі.

Виклад основного матеріалу

Приховані марковські моделі. Діаграма, подана нижче (рис. 2), показує загальну структуру ПММ. Овали – це змінні з випадковим значенням. Випадкова змінна $x(t)$ відповідає значенню прихованої змінної в момент часу t . Випадкова змінна $y(t)$ – це значення змінної, за якою ми спостерігаємо в момент часу t . Стрілки на діаграмі символізують умовні залежності. Із діаграми можна дізнатись, що значення прихованої змінної $x(t)$ (в момент часу t) залежить тільки від значення прихованої змінної $x(t-1)$ (в момент $(t-1)$). Це називається властивістю Маркова. Хоча водночас значення змінної $y(t)$, за якою ми спостерігаємо, залежить лише від значення прихованої змінної $x(t)$ (в момент часу t).

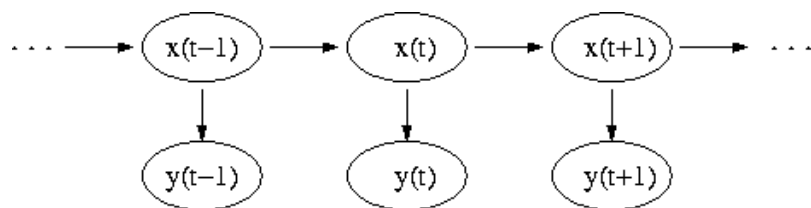


Рис. 2. Загальна схема функціонування прихованої марковської моделі

Ймовірність спостерігати послідовність $Y=y(0),y(1),\dots,y(L-1)$ довжини L дорівнює:

$$P(Y) = \sum_x P(Y|X)P(X) \quad (1)$$

тут сума пробігає по всіх можливих послідовностях прихованих вузлів $X=x(0),x(1),\dots,x(L-1)$.

Основні приховані марковські моделі можна описати за допомогою таких змінних:

N – кількість станів;

T – кількість спостережень;

$q_{(i=1,\dots,N)}$ – параметр для спостереження за зв'язками між станами;

$J_{(i=1,\dots,N;j=1,\dots,N)}$ – ймовірність переходу із стану i до стану j ;

$\Phi_{(i=1,\dots,N)}$ – N – мірний вектор, що складається із j векторів $J_{(i=1,\dots,N;j=1,\dots,N)}$

$x_{(t=1,\dots,T)}$ – стан спостереження за час t ;

$y_{(t=1,\dots,T)}$ – результат спостереження за час t ;

$F(y/q)$ – функція розподілу ймовірності спостережень, параметризованих за q .

Метод подібних траєкторій. Ідея методу полягає в наступному. Маємо ряд спостережень екологічного процесу, що їх зроблено за якийсь час $\{y(1); y(2); \dots; y(n)\}$, графік якого наведено на рис. 3.

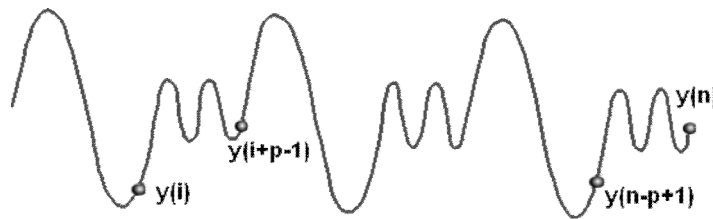


Рис. 3. Динаміка ряду спостережень

Змінна $y(i)$, $i = \overline{1, N}$ тут представлена фізичними значеннями відповідного процесу (наприклад, сила підземних поштовхів).

За обраним критерієм обираємо ділянку траєкторії, “найближчу” до ділянки, яка передуге прогнозованій точці. Надалі оцінюємо прогноз за формулою $y(n+1) = y(i+p)$, де

$$I = \min \left\{ \sum_{i=1}^p |y(j+i-1) - y(n-p+i)| \right\} \quad J = 1, 2, \dots, n-p; \quad (2)$$

$$J = \min_i |y(i+j-1) - y(n)| \quad i = 1, 1+1, \dots, 1+p-1. \quad (3)$$

Лінгвістичне моделювання. За певними правилами числові значення послідовності замінюються символами. Прогнозують пошуком ланцюжків символів і зіставленням їх з ланцюжками з бази даних спостережень. Отримані символи утворюють алфавіт V , з якого, своєю чергою, формуються слова.

При цьому під граматикою (або формальною граматикою) розуміють спосіб опису формальної мови, тобто виділення деякої підмножини з безлічі всіх слів деякого кінцевого алфавіту.

Для прогнозування використовують стохастичну контекстно-вільну граматика. Стохастична контекстно-вільна граматика (СКС) – це контекстно-вільна граматика, в якій кожному правилу виводу відповідає ймовірність.

Контекстно-вільна граматика G – це четвірка (N, T, P, S) :

$S \in N$

N та T – скінченні множини, що не перетинаються;

P – скінченна підмножина $N \times (N \cup T)^*$.

При цьому використовують такі назви:

N – множина нетермінальних символів;

T – множина термінальних символів;

P – множина правил виводу;

S – початковий символ.

Правила $(\alpha, \beta) \in P$ записують як $\alpha \rightarrow \beta$.

У лівій частині правила виводу має знаходитись одна змінна (нетермінальний символ). Формально має виконуватись $\alpha \in N, \beta \in (NUT)^*, |\beta| \geq 1$.

У стохастичних контекстно-вільних граматиках з правилами виведення зіставляють ймовірність використання: $p: P \rightarrow \mathcal{R}$, де $\sum_{p_r \in P} p_r(P_r) = 1$.

Далі застосуємо структурний підхід [6], який раніше застосовували в методах розпізнавання образів. Сутність методу полягає в такому: за певними правилами числові значення ряду замінюються символічними значеннями.

Визначаємо певну кількість символів алфавіту $B = \{b_k\}$, де k – довжина алфавіту. Ряд розбивається на інтервали відповідно до кількості символів алфавіту, і кожному інтервалу призначається свій символ. Тобто замість числового ряду $y(i)$ отримаємо символічний аналог ряду спостережень $\langle e_i \rangle$

Далі ми підраховуємо кількість однакових ланцюжків $\langle e_i e_{i+1} \rangle$; $\langle e_i e_{i+1} e_{i+2} \rangle$; $\langle e_i e_{i+1} e_{i+2} e_{i+3} \rangle$ і т.д. символів. Потім ми підраховуємо всі ланцюжки по 2, 3, 4 і т.д. символів. Частота появи того чи іншого ланцюжка показує ймовірність повторення тих чи інших послідовностей. Так ми перевіряємо, чи є в числовій послідовності подібні траєкторії.

У послідовності e_i проаналізуємо частоту існування пар символів $\langle e_i e_{i+1} \rangle$ і побудуємо таблицю ймовірностей виникнення символу e_{i+1} : $P(e_{i+1} | e_i)$, $i = \overline{1, N-1}$.

Далі в послідовності e_i аналізуємо частоту появи трійок $\langle e_{i-1} e_i e_{i+1} \rangle$ і будуємо таблицю ймовірностей $P(e_{i+1} | e_i, e_{i-1})$, $i = \overline{1, N-2}$. У загальному випадку аналізуємо частоту існування ланцюжків $P(e_{i+1} | e_i \mathbf{K} e_{i+n})$. Тобто обчислюємо ймовірність появи символу e_{i+1} за умови, що попередніми символами є $e_i \mathbf{K} e_{i+n}$.

Для прикладу проілюструємо такі обчислення побудовою лінгвістичної моделі для певного часового ряду на основі алфавіту завдовжки 10 символів: 0..9.

Моделювання за допомогою символів і є лінгвістичним моделюванням.

Лінгвістичне моделювання – комплекс методів, методик і алгоритмів, які використовують процес перетворення числових масивів інформації до лінгвістичних послідовностей, на основі яких відновлюється формальна граMATика.

Лінгвістична модель динамічного процесу складається з таких елементів:

$$F = (D, I, L, G),$$

де D – сукупність часових рядів динамічного процесу та рядів, похідних від вхідних даних; I – спосіб та правила інтервалізації; L – морфізм відображення інтервального представлення ряду на певний алфавіт; G – відновлена граMATика динамічного процесу.

За визначеними вище правилами числові значення послідовності замінюються символами. За допомогою обчислених ймовірностей можемо зробити ймовірнісний прогноз виникнення символу e_i за умови, що відомі ланцюжки попередніх символів $e_i, e_{i-1}, \mathbf{K}, e_{i-k}$. Прогнозування відбувається шляхом пошуку ланцюжків символів і зіставлення їх із ланцюжками з бази даних наявних спостережень. Прогноз подається у вигляді множини значень ймовірностей виникнення того чи іншого стану процесу.

Для підвищення точності прогнозу варто застосовувати поєднання методів. Але точнішим методом прогнозування представляється комбінований або гібридний метод, наприклад: лінгвістичне моделювання – приховані марковські моделі (ЛМ-ПММ).

Основними принципами гібридизації є: принцип неоднорідності, принцип плюралізму, принцип системного аналізу неоднорідного завдання, принцип конструктора, принцип пріоритету знань, принцип поступовості, перший та другий принцип спадкування, принцип самоорганізації агрегованої моделі, принцип повноти зниження продуктивності агрегованої моделі. Ці принципи

певним чином узагальнюють світову практику розроблення гібридних інтелектуальних систем прийняття рішень. Використання цих принципів дозволить створювати агреговані моделі там, де це доцільно, такими, які вони мають бути та функціонуючими згідно з очікуванням.

	1-й вычет	2-й вычет	3-й вычет	4-й вычет	5-й вычет	6-й вычет	7-й вычет	8-й вычет	9-й вычет	0-й вычет
0	0.24	0.12	0.06	0.02	0.00	0.00	0.02	0.05	0.11	0.37
1	0.12	0.14	0.13	0.04	0.01	0.00	0.07	0.09	0.18	0.21
2	0.08	0.14	0.13	0.11	0.04	0.00	0.10	0.12	0.15	0.13
3	0.02	0.07	0.10	0.17	0.10	0.00	0.30	0.10	0.09	0.04
4	0.01	0.02	0.06	0.12	0.19	0.00	0.48	0.10	0.03	0.01
5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6	0.02	0.04	0.04	0.12	0.14	0.00	0.45	0.11	0.05	0.03
7	0.03	0.06	0.10	0.14	0.06	0.00	0.22	0.18	0.12	0.08
8	0.09	0.14	0.15	0.10	0.03	0.00	0.09	0.11	0.17	0.14
9	0.21	0.14	0.10	0.03	0.01	0.00	0.05	0.06	0.11	0.28

	1-й вычет	2-й вычет	3-й вычет	4-й вычет	5-й вычет	6-й вычет	7-й вычет	8-й вычет	9-й вычет	0-й вычет
0	0.14	0.08	0.06	0.01	0.00	0.01	0.00	0.02	0.06	0.62
1	0.08	0.10	0.09	0.04	0.00	0.04	0.01	0.08	0.16	0.40
2	0.05	0.09	0.15	0.07	0.00	0.07	0.06	0.17	0.17	0.17
3	0.01	0.03	0.07	0.20	0.00	0.16	0.27	0.15	0.06	0.04
4	0.00	0.00	0.00	0.25	0.00	0.25	0.12	0.25	0.12	0.00
5	0.01	0.05	0.13	0.24	0.00	0.20	0.20	0.08	0.04	0.04
6	0.00	0.03	0.09	0.41	0.00	0.20	0.18	0.07	0.01	0.01
7	0.03	0.09	0.25	0.20	0.00	0.10	0.07	0.08	0.10	0.08
8	0.09	0.20	0.25	0.07	0.00	0.03	0.03	0.07	0.08	0.17
9	0.37	0.25	0.09	0.02	0.00	0.02	0.01	0.02	0.06	0.17

Рис. 4. Матриця взаємних переходів для алфавіту 0..9

Класичні гібридні системи комбінують аналогові та дискретні моделі. Агрегативні системи моделюють аналітико-статистичні закономірності біхевіористики складних систем. Методологія інтелектуальних експертних систем дозволяє перебороти недоліки символічного підходу за рахунок комбінування із традиційними інформаційними та технологіями штучного інтелекту. У кожному із цих випадків йдеться про становлення нової інформаційної методології моделювання складних процесів і явищ побудовою і застосуванням моделей-гібридів. Зазначимо, що існують різні шляхи досягнення поставленої мети.

З використанням наведеної гібридної ЛМ-ПММ моделі можна враховувати дії, що можуть призводити до різких змін характеристик часового ряду, його тренду тощо.

Висновки та перспективи подальших наукових розвідок

Завжди людство потерпало від цунамі, особливо жителі тихоокеанського узбережжя. І тільки останнім часом з розвитком математичної науки та інформаційних технологій з'явилась можливість прогнозування такого роду явищ. Загальним недоліком статистичних методів є брак історичної інформації. Але люди займаються моніторингом навколишнього середовища, спостерігають за погодою, природними процесами. Тому використання саме статистичних методів є цілком виправданим. Застосування наведеного математичного апарату уявляється можливим з огляду на велику кількість накопиченої інформації щодо спостережених процесів аномальних припливів. Автори зараз проводять численні експерименти задля адаптації математичного апарату і перевірки застосування його на реальних даних.

1. Пелиновский Е. Н. Гидродинамика волн цунами. [Текст] / Е. Н. Пелиновский. – Нижний Новгород: ИПФ РАН, 1996. – 277 с.
2. Локальные цунами: предупреждение и уменьшение риска: сборник статей [Текст] / под ред. Б. В. Левина, М. А. Носова. – М.: Янус-К, 2002.
3. Левин Б. В. Физика цунами и родственных явлений в океане [Текст] / Б. В. Левин, М. А. Носов. – М.: Янус-К, 2005. – 360 с.
4. Селін Ю. М. Системний аналіз екологічно небезпечних процесів різної природи [Текст] / Ю. М. Селін // Системні дослідження та інформаційні технології. – 2007. – № 2. – С. 22–32.
5. Баклан І. В. Математичні моделі прогнозування часових рядів різної природи [Текст] / І. В. Баклан, Ю. М. Селін, Т. В. Шулькевич // Вестн. Херсонського національного техн. ун-та. – Херсон: ХНТУ, 2014. – Вып. 3 (50). – С. 213–218.
6. Баклан І. В. Структурний підхід до аналізу та прогнозування поведінки часових рядів / І. В. Баклан, Ю. М. Селін // Вісник Херсонського національного технічного університету. – Херсон: ХНТУ, 2005. – № 2. – С. 27–31.