

Г. В. Іванець<sup>1</sup>, М. Г. Іванець<sup>2</sup>, І. О. Толкунов<sup>1</sup>, І. І. Попов<sup>1</sup><sup>1</sup> Національний університет цивільного захисту України, Харків, Україна<sup>2</sup> Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків, Україна

## ФОРМАЛІЗОВАНА МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ СУМІСНОГО ПРОГНОЗУВАННЯ ТА ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ГОТОВНОСТІ РЕАГУВАННЯ НА НАДЗВИЧАЙНІ СИТУАЦІЇ

**Анотація. Актуальність.** На теперішній час попередження надзвичайних ситуацій слід розглядати як складний сумісний процес прогнозування надзвичайних ситуацій та завчасного реагування на загрози їх виникнення або пом'якшення можливих наслідків. **Мета.** Розробка формалізованої математичної моделі сумісного прогнозування надзвичайних ситуацій та забезпечення готовності реагування на надзвичайні ситуації. **Метод.** Формалізована математична модель сумісного прогнозування та забезпечення готовності реагування на надзвичайні ситуації – це система аналітичних залежностей, які в сукупності дозволяють вирішити поставлену проблему дослідження. Вона реалізує принцип системного підходу до вирішення проблеми попередження надзвичайних ситуацій з метою недопущення їх виникнення або мінімізації можливих наслідків. Попередження надзвичайних ситуацій – це складний системний процес, пов'язаний з аналізом загроз виникнення надзвичайних ситуацій, їх прогнозуванням та забезпеченням готовності реагування підрозділів цивільного захисту. **Результати.** Розроблено формалізовану математичну модель сумісного прогнозування та забезпечення готовності реагування на надзвичайні ситуації і керуючий алгоритм, який реалізує розроблену математичну модель. Формалізована математична модель сумісного прогнозування та забезпечення готовності реагування на надзвичайні ситуації уявляє собою об'єднання двох взаємозв'язаних моделей: моделі прогнозування надзвичайних ситуацій та можливих завдань збитків внаслідок них і моделі забезпечення готовності реагування на надзвичайні ситуації. **Висновки.** Формалізована математична модель сумісного прогнозування та забезпечення готовності реагування на надзвичайні ситуації включає математичні моделі прогнозування надзвичайних ситуацій за характером, видами, рівнями та можливих наслідків внаслідок них як в державі в цілому, так і її регіонах; математичні моделі оцінки потенціальної технічної спроможності та готовності підрозділів до виконання завдань за призначенням, оптимального розподілу ресурсів для забезпечення готовності підрозділів, оптимізації територіальних структур цивільного захисту, прогнозу витрат коштів, технічного та людського забезпечення для ліквідації надзвичайних ситуацій. Отримані результати дослідження є фундаментом для обґрунтування організаційно-технічних заходів щодо адекватного реагування на надзвичайні ситуації різного характеру в реальних умовах.

**Ключові слова:** формалізована математична модель, керуючий алгоритм, надзвичайна ситуація, збитки від надзвичайних ситуацій, рівень готовності.

### Номенклатура

НС – надзвичайна ситуація;

ЦЗ – цивільний захист;

ДСНС – Державна служба України з надзвичайних ситуацій;

 $n_{НС}(t)$  – кількість НС в державі; $n_{НС}^i(t)$  – кількість НС в  $i$ -му регіоні; $P_{НС}^i$  – ймовірність виникнення НС в  $i$ -му регіоні в разі виникнення НС в державі; $n_{ТХ}(t)$ ,  $n_{ПХ}(t)$ ,  $n_{СХ}(t)$  – кількість НС відповідно техногенного, природного та соціального характеру; $P_{ТХ}$ ,  $P_{ПХ}$ ,  $P_{СХ}$  – ймовірності виникнення НС відповідно техногенного, природного та соціального характеру в державі; $l_i(t)$ ,  $v_i(t)$ ,  $r_i(t)$  – кількість НС за видами відповідно техногенного, природного та соціального характеру в державі; $P_{ТХ_i}$ ,  $P_{ПХ_i}$ ,  $P_{СХ_i}$  – ймовірності виникнення НС техногенного, природного та соціального характеру  $i$ -го виду в державі; $n_{ТХ}^i(t)$ ,  $n_{ПХ}^i(t)$ ,  $n_{СХ}^i(t)$  – кількість НС відповідно техногенного, природного та соціального характеру в  $i$ -му регіоні; $P_{ТХ}^i$ ,  $P_{ПХ}^i$ ,  $P_{СХ}^i$  – ймовірності виникнення НС відповідно техногенного, природного та соціального характеру в  $i$ -му регіоні в разі виникнення НС в державі; $n_{DP}(t)$ ,  $n_{PP}(t)$ ,  $n_{MP}(t)$ ,  $n_{OP}(t)$  – кількість НС відповідно державного, регіонального, місцевого та об'єктового рівнів; $P_{DP}$ ,  $P_{PP}$ ,  $P_{MP}$ ,  $P_{OP}$  – ймовірності виникнення НС відповідно державного, регіонального, місцевого та об'єктового рівнів в державі; $n_{DP}^i(t)$ ,  $n_{PP}^i(t)$ ,  $n_{MP}^i(t)$ ,  $n_{OP}^i(t)$  – кількість НС державного, регіонального, місцевого та об'єктового рівнів в  $i$ -му регіоні в разі виникнення НС в державі; $P_{DP}^i$ ,  $P_{PP}^i$ ,  $P_{MP}^i$ ,  $P_{OP}^i$  – ймовірності виникнення НС державного, регіонального, місцевого та об'єктового рівнів в  $i$ -му регіоні в разі виникнення НС в державі; $ZB(t)$  – збитки внаслідок НС; $P_T$  – потенційна технічна спроможність підрозділів ЦЗ до дій при НС; $K_{TD}$  – коефіцієнта технічної досконалості зразків озброєння і техніки підрозділу ЦЗ; $K_E$  – узагальнений експлуатаційний коефіцієнт зразків озброєння та техніки підрозділу ЦЗ; $A_i$  – ТТХ озброєнням і техніки; $K_{YK}$  – коефіцієнт укомплектованості підрозділу ЦЗ озброєнням і технікою; $K_{TT}$  – коефіцієнт технічної готовності підрозділу ЦЗ; $K_{PEC}$  – коефіцієнт запасу ресурсу зразків озброєння та техніки підрозділу ЦЗ; $P(t)$  – ймовірність готовності підрозділу ЦЗ до виконання завдань за призначенням в даний момент часу;

$R^{ндр.}(t)$  – ймовірність працездатності необхідної кількості зразків озброєння і техніки при виникненні НС;  
 $P_{III}(t)$  – ймовірність професійної підготовленості особового складу підрозділу до дій у НС;  
 $C_i(t)$  – наявність ресурсу  $i$ -го виду для ліквідації НС;  
 $S_i^{ДСНС}$  – чисельність сертифікованих структур ЦЗ ДСНС в  $i$ -му регіоні держави;  
 $BT(t)$  – загальні витрати коштів на ліквідацію наслідків НС;  
 $T(t)$  – кількість одиниць техніки для ліквідації НС;  
 $OC(t)$  – кількість задіяного особового складу для ліквідації НС.

### Вступ

Науково-технічний прогрес кожної розвиненої країни сприяє не тільки розвитку сучасного виробництва, покращенню умов праці і добробуту громадян, але й збільшує ризики виникнення надзвичайних ситуацій (НС) [1,2]. Величезне регіональне навантаження територій держав потужними промисловими та енергетичними об'єктами збільшує ризики аварій, а наявність несприятливих природних умов та схильність до проявів небезпечних природних явищ підсилює гостроту проблеми щодо вивчення стану техногенної й природної безпеки та необхідність пошуку шляхів його покращення [3, 4].

На сьогоднішній день вирішення проблеми попередження НС різного характеру в реальних умовах ґрунтується на аналізі, прогнозуванні виникнення НС та забезпеченні готовності підрозділів реагування цивільного захисту (ЦЗ) на можливі загрози з метою їх недопущення або ліквідації можливих наслідків [5,6]. Попередження НС - це складний системний процес, пов'язаний з аналізом загроз виникнення НС, їх прогнозуванням та забезпеченням готовності реагування підрозділів ЦЗ. Однак відомі методи та моделі володіють обмеженими можливостями щодо сумісного прогнозування загроз виникнення НС та готовності реагування на них. Це породжує протиріччя – з одного боку це необхідність розглядати попередження НС як складний системний процес, пов'язаний з сумісним прогнозуванням загроз їх виникнення та завчасним реагуванням на них, а з другого боку – обмежені можливості для цього наявних методів та моделей.

Виходячи з цього, наукова-практична проблема в сфері ЦЗ, а саме розробка формалізованої математичної моделі сумісного прогнозування та забезпечення готовності реагування на НС в реальних умовах, є актуальною.

**Постановка задачі.** Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- розробити формалізовану математичну модель сумісного прогнозування та забезпечення готовності реагування на НС;
- запропонувати керуючий алгоритм, який реалізує розроблену математичну модель.

**Огляд літератури.** Аналіз літературних джерел показує, що при вирішенні проблеми попередження НС різного характеру в реальних умовах розглядають окремо задачі прогнозування процесів

виникнення НС та забезпечення готовності реагування на них. При цьому прогнозування НС базуються на імовірісно-статистичному, імовірісно-детермінованому і детерміново-імовірісному підходах [7,8,9]. Основний недолік імовірісного підходу – складність розробки моделей процесів виникнення НС, що значно ускладнює проведення аналізу розвитку даних процесів в динаміці. Для подолання цих незручностей використовують лінійні, нелінійні, ступеневі, порядкові регресії [10]. До переваг даних моделей відносять простоту, гнучкість, а також однозначність їх аналізу і проектування. Недоліками лінійних регресійних моделей є низька адаптивність і відсутність спроможності моделювання нелінійних процесів. Основним недоліком нелінійних регресійних моделей є складність визначення виду функціональної залежності, а також труднощі визначення параметрів моделі.

Авторами роботи [11] запропоновано комбінований метод прогнозування процесу виникнення НС природного характеру, який відрізняється тим, що дозволяє здійснювати комплексний прогноз НС як в цілому, так і за видами з врахуванням тенденцій періодичних змін даного процесу. Однак, періодичність змін процесів виникнення НС характерна тільки для природних НС і не характерна для НС техногенного або соціального характеру.

Ефективність виконання завдань за призначенням підрозділами ЦЗ в першу чергу залежить від рівня їх готовності до дій при НС, який повинен відповідати ступеню та характеру загроз. В [12] рівень готовності підрозділу до виконання завдань за призначенням оцінюється на основі показників з укомплектованості підрозділів особовим складом, технічними засобами, індивідуальними засобами захисту, підготовленості особового складу, наявності матеріально-технічних ресурсів і т.п. В якості показника рівня готовності розглядається середнє значення цих показників, які взяті з відповідними ваговими коефіцієнтами. Запропонований показник рівня готовності підрозділу не в повній мірі відображає готовність підрозділу до виконання поставлених завдань по ліквідації НС в довільний момент часу та ступінь безвідмовності функціонування його, як цілісної системи, на протязі часу виконання робіт.

Моделі готовності рятувальних підрозділів до дій при НС представлені в роботах [13]. При цьому рятувальні підрозділи розглядаються як система, складовими елементами якої є спеціалісти (рятувальники) та необхідна технічна оснастка (експлуатаційний модуль). Запропоновано моделі функціонування експлуатаційного модуля в різних експлуатаційних станах та рятувальників в різних функціональних режимах. У роботі [14] запропоновано системний підхід для оцінки готовності сил та засобів підрозділів ЦЗ до дій при НС. Під час цього враховувались показники ймовірності безвідмовної роботи технічних засобів, а також рівень професійної підготовки та рівень укомплектованості підрозділу особовим складом.

В [15] запропонована методика аналізу показників оперативного реагування підрозділів ЦЗ, яка полягає у оцінці факторів, які характеризують даний

процес із застосуванням методів теорії графів. Автори [16] розглядають моделювання розподілу ресурсів для ліквідації пожеж різного характеру походження. Але при цьому оцінка необхідних людських ресурсів не розглядається.

Комбінований метод мінімізації наслідків НС державного рівня розглянуто в роботі [17]. Він базується на моделюванні стохастичних процесів дискретними ланцюгами Маркова. Однак, в цьому випадку не враховується щільність проживаючого населення на території НС та організаційно-штатна структура підрозділів ЦЗ. В роботі [18] представлено результати оптимізації підрозділів ЦЗ по регіонах України на основі врахування стохастичної природи виникнення та ліквідації НС. Автори зазначають, що при визначенні чисельності підрозділів ЦЗ для ліквідації наслідків НС в регіонах держави необхідно враховувати: інтенсивність реалізації загроз на території регіону; інтенсивність ліквідації наслідків НС; очікувану кількість залучених сил до ліквідації наслідків НС. Однак при цьому не враховуються наслідки від НС для територій з різною щільністю проживаючого населення.

Таким чином, проведений аналіз літературних джерел показує, що проблема попередження НС на теперішній час не розглядається в достатній мірі як складний системний процес, пов'язаний з сумісним прогнозуванням загрози їх виникнення та забезпеченням готовності реагування підрозділів ЦЗ. Це вказує на необхідність розробки формалізованої математичної моделі сумісного прогнозування та забезпечення готовності реагування на НС, яка б дозволяла вирішити дану проблему з системної точки зору.

### Матеріали і методи

Формалізована математична модель сумісного прогнозування та забезпечення готовності реагування на НС уявляє собою об'єднання двох взаємозв'язаних моделей: моделі прогнозування НС та можливих завданих збитків внаслідок них як по державі в цілому, так і її регіонів; моделі забезпечення готовності реагування на НС.

Математична модель прогнозування НС та можливих завданих збитків внаслідок [20] них уявляє собою систему співвідношень та рівнянь в математичній формі, які відображають найбільш важливі особливості й властивості процесів виникнення та наслідків НС як в державі в цілому, так і її регіонах:

$$\begin{aligned} n_{HC}(t) &= U_1(r_0, r_1, r_2, \dots, t); n_{HC}^i(t) = U_2\{n_{HC}(t), P_{HC}^i\}; \\ n_{TX}(t) &= F_1\{n_{HC}(t), P_{TX}\}; n_{PX}(t) = F_2\{n_{HC}(t), P_{PX}\}; \\ n_{CX}(t) &= F_3\{n_{HC}(t), P_{CX}\}; l_i(t) = \Psi_1\{n_{TX}(t), P_{TX_i}\}; \\ v_i(t) &= \Psi_2\{n_{PX}(t), P_{PX_i}\}; r_i(t) = \Psi_3\{n_{CX}(t), P_{CX_i}\}; \\ n_{TX}^i(t) &= S_1\{n_{TX}(t), P_{TX}^i\}; n_{PX}^i(t) = S_2\{n_{PX}(t), P_{PX}^i\}; \\ n_{CX}^i(t) &= S_3\{n_{CX}(t), P_{CX}^i\}; n_{DP}(t) = Q_1\{n_{HC}(t), P_{DP}\}; \\ n_{PP}(t) &= Q_2\{n_{HC}(t), P_{PP}\}; n_{MP}(t) = Q_3\{n_{HC}(t), P_{MP}\}; \\ n_{OP}(t) &= Q_4\{n_{HC}(t), P_{OP}\}; n_{DP}^i(t) = \Phi_1\{n_{DP}(t), P_{DP}^i\}; \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} n_{PP}^i(t) &= \Phi_2\{n_{PP}(t), P_{PP}^i\}; n_{MP}^i(t) = \Phi_3\{n_{MP}(t), P_{MP}^i\}; \\ n_{OP}^i(t) &= \Phi_4\{n_{OP}(t), P_{OP}^i\}; \end{aligned}$$

$$ZB(t) = \Theta\{n_{DP}(t), n_{PP}(t), n_{MP}(t), n_{OP}(t)\},$$

де  $n_{HC}(t)$  – кількість НС в державі;  $(r_0, r_1, \dots, r_k)$  – параметри функції;  $n_{HC}^i(t)$  – кількість НС в  $i$ -му регіоні;  $P_{HC}^i$  – ймовірність виникнення НС в  $i$ -му регіоні в разі виникнення НС в державі;  $n_{TX}(t)$ ,  $n_{PX}(t)$ ,  $n_{CX}(t)$  – кількість НС відповідно техногенного, природного та соціального характеру;  $P_{TX}$ ,  $P_{PX}$ ,  $P_{CX}$  – ймовірності виникнення НС відповідно техногенного, природного та соціального характеру в державі;  $l_i(t)$ ,  $v_i(t)$ ,  $r_i(t)$  – кількість НС за видами відповідно техногенного, природного та соціального характеру в державі;  $P_{TX_i}$ ,  $P_{PX_i}$ ,  $P_{CX_i}$  – ймовірності виникнення НС техногенного, природного та соціального характеру  $i$ -го виду в державі;  $n_{TX}^i(t)$ ,  $n_{PX}^i(t)$ ,  $n_{CX}^i(t)$  – кількість НС відповідно техногенного, природного та соціального характеру в  $i$ -му регіоні;  $P_{TX}^i$ ,  $P_{PX}^i$ ,  $P_{CX}^i$  – ймовірності виникнення НС відповідно техногенного, природного та соціального характеру в  $i$ -му регіоні в разі виникнення НС в державі;  $n_{DP}(t)$ ,  $n_{PP}(t)$ ,  $n_{MP}(t)$ ,  $n_{OP}(t)$  – кількість НС відповідно державного, регіонального, місцевого та об'єктового рівнів;  $P_{DP}$ ,  $P_{PP}$ ,  $P_{MP}$ ,  $P_{OP}$  – ймовірності виникнення НС відповідно державного, регіонального, місцевого та об'єктового рівнів в державі;  $n_{DP}^i(t)$ ,  $n_{PP}^i(t)$ ,  $n_{MP}^i(t)$ ,  $n_{OP}^i(t)$  – кількість НС відповідно державного, регіонального, місцевого та об'єктового рівнів в  $i$ -му регіоні в разі виникнення НС в державі;  $P_{DP}^i$ ,  $P_{PP}^i$ ,  $P_{MP}^i$ ,  $P_{OP}^i$  – ймовірності виникнення НС відповідно державного, регіонального, місцевого та об'єктового рівнів в  $i$ -му регіоні в разі виникнення НС в державі;  $ZB(t)$  – збитки внаслідок НС.

Таким чином, формалізована математична модель процесів виникнення НС та можливих збитків внаслідок них уявляє собою систему аналітичних залежностей, які описують в цілому процес виникнення НС в державі, залежність кількості НС в регіонах від кількості НС в державі, розподіл НС за характером походження в разі виникнення НС в державі, розподіл НС за видами в разі виникнення техногенних, природних та соціальних НС в державі, розподіл НС за характером в регіонах в разі виникнення НС відповідно техногенного, природного та соціального характеру в державі, розподіл НС за рівнями в разі виникнення НС в державі, розподіл НС за рівнями в регіонах в разі виникнення НС відповідного рівня в державі та можливі збитки внаслідок НС. Ці дані є основою для планування та реалізації заходів щодо підтримання готовності підрозділів реагування ЦЗ на НС.

Рівень готовності підрозділів ЦЗ до ефективного виконання завдань щодо реагування та ліквідації наслідків НС різного характеру визначається належною технічною оснасткою, рівнем готовності техніки до застосування і професійною здатністю підрозділів до дій при НС. Потенційна технічна спроможність формувань та підрозділів ЦЗ визначається сукупністю матеріальних факторів, які визначають їх стан та здатність до виконання завдань за призначенням. озброєння та технічна оснащеність складають основу потенційної спроможності формувань та підрозділів ЦЗ до виконання завдань за призначенням та є визначальним фактором для успішного вирішення задач щодо реагування та ліквідації наслідків НС. Вона залежить від показників технічної досконалості зразків озброєння та техніки даного формування (підрозділу), а також від експлуатаційних показників цих зразків:

$$P_T = F(K_{TD}, K_E), \quad (2)$$

де  $K_{TD}$  – коефіцієнт технічної досконалості зразків озброєння і техніки підрозділу ЦЗ;  $K_E$  – узагальнений експлуатаційний коефіцієнт зразків озброєння та техніки підрозділу ЦЗ. Коефіцієнт технічної досконалості характеризує ступінь відповідності основних ТТХ сучасним вимогам щодо технічного оснащення підрозділів ЦЗ:

$$K_{TD} = G(A_i), \quad (3)$$

де  $A_i$  – ТТХ озброєнням і техніки.

Узагальнений експлуатаційний коефіцієнт усіх зразків озброєння та техніки підрозділу ЦЗ визначається укомплектованістю, технічною готовністю та запасом ресурсу озброєння та техніки підрозділу:

$$K_E = Q(K_{YK}, K_{TG}, K_{PEC}), \quad (4)$$

де  $K_{YK}$  – коефіцієнт укомплектованості підрозділу ЦЗ озброєнням і технікою;  $K_{TG}$  – коефіцієнт технічної готовності підрозділу ЦЗ;  $K_{PEC}$  – коефіцієнт запасу ресурсу зразків озброєння та техніки підрозділу ЦЗ. Ймовірність готовності підрозділу ЦЗ до реагування та ліквідації НС в даний момент часу визначається ймовірністю працездатності необхідної кількості зразків озброєння і техніки на момент виникнення НС, ймовірністю професійної підготовленості особового складу підрозділу до дій у НС та наявності ресурсу і-го виду для ліквідації НС:

$$P(t) = \Lambda \left\{ R^{nidp}(t), P_{III}(t), C_i(t) \right\}, \quad (5)$$

де  $P(t)$  – ймовірність готовності підрозділу ЦЗ до виконання завдань за призначенням в даний момент часу;  $R^{nidp}(t)$  – ймовірність працездатності необхідної кількості зразків озброєння і техніки на момент виникнення НС;  $P_{III}(t)$  – ймовірність професійної підготовленості особового складу підрозділу до дій у НС;  $C_i(t)$  – наявність ресурсу і-го виду для ліквідації НС. Чисельність сертифікованих сил ЦЗ ДСНС в і-му регіоні держави повинно відповідати рівню техногенних, природних та соціальних загроз на цій території:

$$S_i^{DCHC} = L \left\{ n_{TX}^i(t), n_{IIX}^i(t), n_{CX}^i(t) \right\}, \quad (6)$$

де  $S_i^{DCHC}$  – чисельність сертифікованих структур ЦЗ ДСНС в і-му регіоні держави. Витрати коштів на ліквідацію наслідків НС різного характеру є функцією, яка визначається процесами виникнення техногенних, природних та соціальних НС:

$$BT(t) = \Omega_1 \left\{ n_{TX}(t), n_{IIX}(t), n_{CX}(t) \right\}, \quad (7)$$

де  $BT(t_{np})$  – загальні витрати коштів на ліквідацію наслідків НС. Необхідне технічне забезпечення та необхідна кількість задіяного особового складу для ліквідації наслідків НС в даний момент часу визначається кількістю і характером НС:

$$T(t) = \Omega_2 \left\{ n(t), n_{TX}(t), n_{CX}(t) \right\}, \quad (8)$$

$$OC(t) = \Omega_3 \left\{ n(t), n_{TX}(t), n_{IIX}(t), n_{CX}(t) \right\}, \quad (9)$$

де  $T(t)$  – кількість одиниць техніки для ліквідації НС;  $OC(t)$  – кількість задіяного особового складу для ліквідації НС.

З урахуванням вище викладеного математична модель визначається системою залежностей (2)–(9):

$$P_T = F(K_{TD}, K_E); K_E = Q(K_{YK}, K_{TG}, K_{PEC});$$

$$P(t) = \Lambda \left\{ R^{nidp}(t), P_{IIX}(t), C_i(t) \right\}; K_{TD} = G(A_i);$$

$$S_i^{DCHC} = L \left\{ n_{TX}^i(t), n_{IIX}^i(t), n_{CX}^i(t) \right\}; \quad (10)$$

$$BT(t) = \Omega_1 \left\{ n_{TX}(t), n_{IIX}(t), n_{CX}(t) \right\};$$

$$T(t) = \Omega_2 \left\{ n(t), n_{TX}(t), n_{IIX}(t), n_{CX}(t) \right\};$$

$$OC(t) = \Omega_3 \left\{ n(t), n_{TX}(t), n_{IIX}(t), n_{CX}(t) \right\};$$

Таким чином, формалізована математична модель забезпечення готовності реагування на НС уявляє собою систему з 8 аналітичних залежностей. Перша описує потенційну технічну спроможність формувань та підрозділів ЦЗ до виконання завдань за призначенням. Друга характеризує ступінь відповідності основних ТТХ сучасним вимогам щодо технічного оснащення підрозділів ЦЗ. Третя характеризує експлуатаційні можливості зразків озброєння та техніки підрозділу ЦЗ. Четверта визначає ймовірність готовності підрозділу ЦЗ до реагування та ліквідації НС в даний момент часу. П'ята дозволяє оцінити чисельність сертифікованих сил ЦЗ ДСНС в і-му регіоні з врахуванням рівня техногенних, природних та соціальних загроз на цій території. Шоста дозволяють визначити витрати коштів на ліквідацію наслідків НС різного характеру НС. Сьома дозволяє оцінити необхідне технічне забезпечення для ліквідації наслідків НС в даний момент часу. Восьма дозволяє оцінити необхідну кількість задіяного особового складу для ліквідації наслідків НС в даний момент часу.

Формалізована математична модель сумісного прогнозування та забезпечення готовності реагування на НС уявляє собою об'єднання моделі прогнозування НС та можливих завданих збитків внаслідок них (1) і моделі забезпечення готовності реагування

на НС (10). Вона реалізує принцип системного підходу до вирішення проблеми попередження НС з метою недопущення їх виникнення або мінімізації можливих наслідків.

На основі розробленої формалізованої математичної моделі сумісного прогнозування та забезпечення готовності реагування на НС розроблено керуючий алгоритм її реалізації (рис. 1).

Алгоритм складається з 15 блоків, які розміщені на 5 ієрархічних рівнях.

Перший рівень складають блок збору та обробки статистичної інформації про НС за деякий період моніторингу; блок збору та обробки інформації про укомплектованість підрозділів ЦЗ озброєнням і технікою, технічний стан, тактико-технічні та експлуатаційні характеристики; блок збору інформації про укомплектованість підрозділів ЦЗ особовим складом та їх рівень професійної підготовки.

На другому рівні розміщені блок аналізу інформації про НС в цілому, за характером, видами, рівнями в державі та її регіонах; блок аналізу інформації про укомплектованість підрозділів ЦЗ озброєнням і технікою, технічний стан, тактико-технічні та експлуатаційні характеристики; блок аналізу інформації про укомплектованість підрозділів ЦЗ особовим складом та їх рівень професійної підготовки.

На третьому рівні розміщені блок прогнозування процесів виникнення НС в цілому, за характером, рівнями, видами в державі та її регіонах; блок оцінки потенційної технічної спроможності підрозділів ЦЗ до дій при НС; блок оцінки укомплектованості та професійної підготовленості особового складу підрозділів ЦЗ.

На четвертому рівні розміщені блок прогнозування можливих збитків внаслідок НС; блок оцінки готовності підрозділів ЦЗ щодо реагування та ліквідації наслідків НС, матеріально-технічного, фінансового та людського забезпечення; блок оптимізації територіальних структур ЦЗ з врахуванням стану техногенно-природної небезпеки регіонів.

П'ятий рівень складають блок формування рішення щодо дій підрозділів ЦЗ за призначенням, блок реалізації дій підрозділів ЦЗ за призначенням та блок оцінки ефективності і корегування рішень на основі аналізу дій підрозділів ЦЗ.

Таким чином, керуючий алгоритм реалізує розроблену формалізовану математичну модель сумісного прогнозування та забезпечення готовності реагування на НС і складається з 15 блоків, які розміщені на 5 ієрархічних рівнях і зв'язані прямими та зворотними зв'язками.

### Обговорення

В результаті проведених досліджень розроблена формалізована математична модель сумісного прогнозування та забезпечення готовності реагування на НС, яка реалізує принцип системного підходу до вирішення проблеми попередження надзвичайних ситуацій з метою недопущення їх виникнення або мінімізації можливих наслідків. Попередження надзвичайних ситуацій - це складний системний процес, пов'язаний з аналізом загроз виникнення

НС, їх прогнозуванням та забезпеченням готовності реагування підрозділів цивільного захисту.

Формалізована математична модель включає математичні моделі прогнозування НС за характером, видами, рівнями та можливих наслідків внаслідок них як в державі в цілому, так і її регіонах; математичні моделі оцінки потенційної технічної спроможності та готовності підрозділів до виконання завдань за призначенням, оптимального розподілу ресурсів для забезпечення готовності підрозділів, оптимізації територіальних структур ЦЗ, прогнозу витрат коштів, технічного та людського забезпечення для ліквідації НС.

Подальші дослідження в цьому напрямку повинні бути спрямовані на дослідження впливу різноманітних дестабілізуючих факторів на процеси виникнення та розвитку НС в різних регіонах держави, мобільності сил і засобів ЦЗ з врахуванням наявності їх на територіях сусідніх регіонів держави.

### Висновки

1. Розроблено формалізовану математичну модель сумісного прогнозування та забезпечення готовності реагування на НС, яка уявляє собою об'єднання моделі прогнозування НС та можливих завданих збитків внаслідок них і моделі забезпечення готовності реагування на НС. Це реалізує принцип системного підходу до вирішення проблеми попередження НС з метою недопущення їх виникнення або мінімізації можливих наслідків.

2. Розроблено керуючий алгоритм, який реалізує формалізовану математичну модель сумісного прогнозування та забезпечення готовності реагування на НС. Його використання передбачає виконання наступних процедур: збір, обробка, аналіз інформації про НС в державі за деякий попередній період моніторингу, про укомплектованість підрозділів ЦЗ озброєнням і технікою, технічний стан, тактико-технічні та експлуатаційні характеристики; про укомплектованість підрозділів ЦЗ особовим складом та їх рівень професійної підготовки; аналіз інформації про НС, про укомплектованість підрозділів ЦЗ озброєнням і технікою, технічний стан, тактико-технічні та експлуатаційні характеристики, про укомплектованість підрозділів ЦЗ особовим складом та їх рівень професійної підготовки; прогнозування процесів виникнення НС, оцінки потенційної технічної спроможності підрозділів ЦЗ до дій при НС, оцінки укомплектованості та професійної підготовленості особового складу підрозділів ЦЗ; прогнозування можливих збитків внаслідок НС, оцінки готовності підрозділів ЦЗ щодо реагування та ліквідації наслідків НС, матеріально-технічного, фінансового та людського забезпечення, оптимізації територіальних структур ЦЗ з врахуванням стану техногенно-природної небезпеки регіонів держави; формування рішення щодо дій підрозділів ЦЗ з метою адекватного реагування на НС та ліквідації їх наслідків, оцінки ефективності та корегування рішень на основі аналізу дій підрозділів реагування. Він складається з 15 блоків, які розміщені на 5 ієрархічних рівнях і зв'язані прямими та зворотними логічними зв'язками.

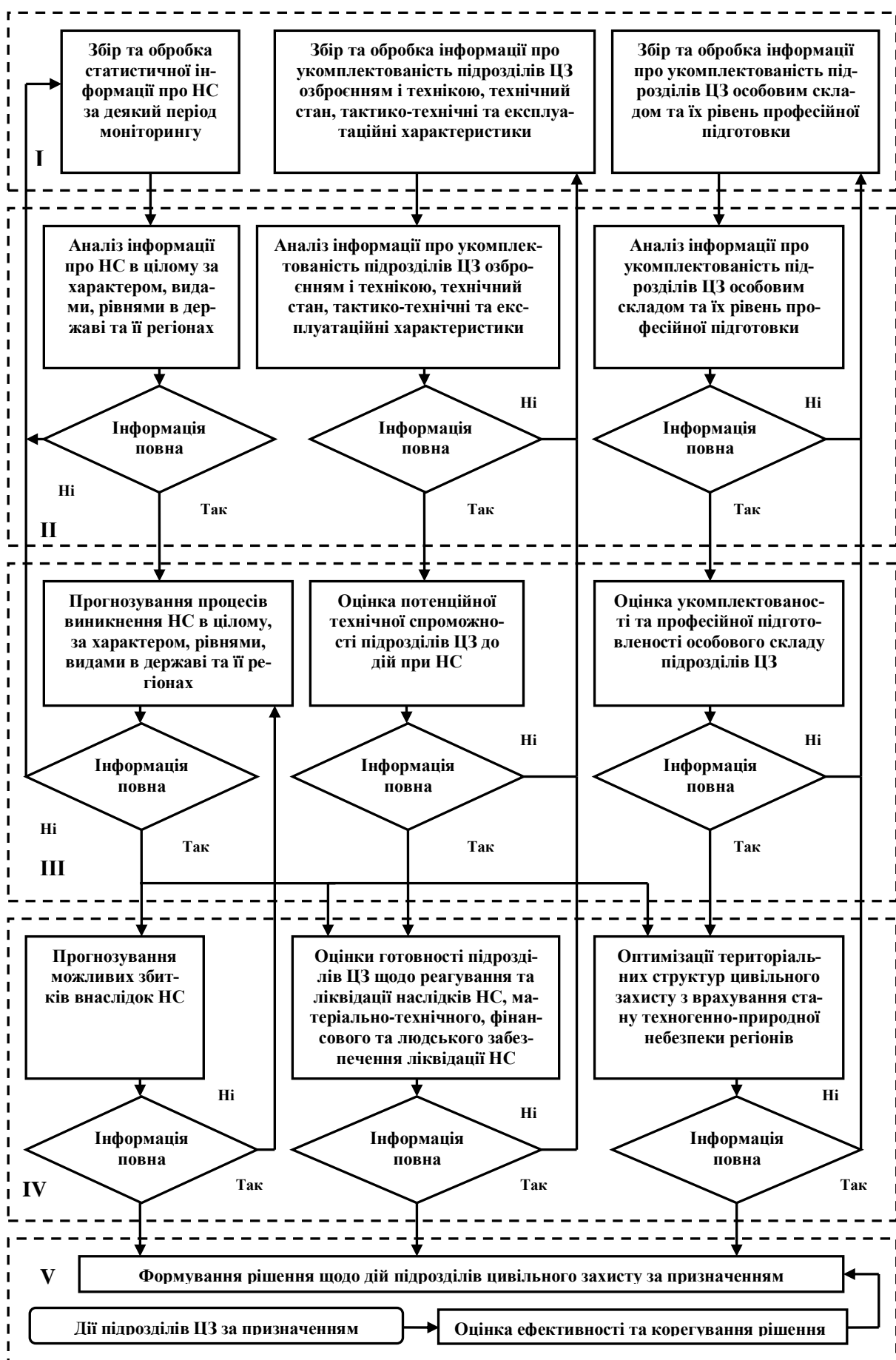


Рис. 1. Керуючий алгоритм реалізації формалізованої математичної моделі сумісного прогнозування та забезпечення готовності реагування на НС

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Rybalova, O., Artemiev, S., Sarapina, M., Tsybmal, B., Bakhareva, A., Shestopalov, O., Filenko, O. (2018). Development of methods for estimating the environmental risk of degradation of the surface water state. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2(10 (92)), 4–17. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.127829>.
2. Bakhareva, A., Shestopalov, O., Filenko, O., Tykhomirova, T., Bryhada, O. (2018). Studying the influence of design and operation mode parameters on efficiency of the systems of biochemical purification of emissions. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(10(93)), 59–71. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.133316>.
3. Guskova, N.D., Neretina, E.A. (2013). Threats of natural character, factors affecting sustainable development of territories and their prevention. *Journal of the Geographical Institute Jovan Cvijic, SASA*, 63(3), 227–237.
4. Dubinin, D., Korytchenko, K., Lisnyak, A., Hrytsyna, I., Trigub, V. (2017). Numerical simulation of the creation of a fire fighting barrier using an explosion of a combustible charge. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6(10 (90)), 11–16. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.114504>.
5. Nivolianitou Z., Synodinou B. A Towards emergency management of natural disasters and critical accidents: The Greek experience // *Journal of Environmental Management*. 2011. Vol. 92, Issue. 10, 2657–2665.
6. Новоселов С.В., Панихидников С.А. Проблемы прогнозирования количества чрезвычайных ситуаций статистическими методами // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2017. №10, 60–71.
6. Deng, S.C., Wu, Q., Shi, B. (2014) Prediction of Resource for Responding Waterway Transportation Emergency Based on Case-Based Reasoning // *China Safety Science Journal*, 24, 79–84.
7. Vasiliev M., Movchan I., Koval O. Diminishing of ecological risk via optimization of fire-extinguishing system projects in timber-yards // *Naukovi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2014. Issue 5, 106–113.
8. Mygalenko, K., Nuyanzin, V., Zemlianskiy, A., Dominik, A., Pozdieiev, S. (2018). Development of the technique for restricting the propagation of fire in natural peat ecosystems // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1 (10(91)), 31–37.
9. Sun, B.Z., Ma, W.M. and Zhao, H.Y. (2013) A Fuzzy Rough Set Approach to Emergency Material Demand Prediction over Two Universes. *Applied Mathematical Modeling*, 37, 7062–7070. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apm.2013.02.008>.
10. Development of combined method for predicting the process of the occurrence of emergencies of natural character. / Ivanets H., Horielyshev S., Ivanets M., D. Baulin, Tolkunov I., Gleizer N., Nakonechniy A. // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. Vol. 5, Issue 10(95), 48–55. doi:<https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.143045>.
11. Неклонський І.М., Самарін В.О., Харламов В.В. Спектральний підхід до оцінювання готовності аварійно-рятувальних підрозділів до дій за призначенням / *Проблеми надзвичайних ситуацій*. Х.: НУЦЗУ, 2016. Вип. 23, 113–120.
12. Самарин В.А., Сокол Я.С. Модель готовности спасательных систем, использующих техническое оснащение для проведения аварийно-спасательных работ. *Проблеми надзвичайних ситуацій*. Х.: НУЦЗУ, 2015. Вип. 21, 76–82.
13. Самарин В.О. Модель готовности складових рятувальних сил до дій за призначенням / В.О. Самарин, І.М. Неклонський, Д.Л. Соколов // *Проблеми надзвичайних ситуацій: зб. наук. пр. Харків: НУЦЗУ, 2015. Вип. 22, 113–118.*
14. Власов К.С., Денисов А.Н. Методика анализа показателей оперативного реагирования пожарно-спасательных подразделений // *Технология техногенной безопасности*, 2016. № 3(67), 207–213.
15. Lee, Yohan, Byungdoo Lee, and Kyung Ha Kim (2014). Optimal spatial allocation of initial attack resources for firefighting in the republic of Korea using a scenario optimization model. *Journal of Mountain Science*, 11.2, 323–335.
16. Martha A. Centeno A Markov chain location-allocation meta-model for hurricane relief planning / Martha A. Centeno, Desiree Tejada-Calvo // *Int. J. of Emergency Management*. 2014 Vol.10. No.3/4, 209–240.
17. Рогозін А.С. Оптимізація розподілу сил цивільного захисту по регіонах України / А.С. Рогозін, О.В. Пирогов, Є.А. Яровий // *Проблеми надзвичайних ситуацій*. Харків: НУЦЗУ, 2016. Вип. 23, 134–140.
18. Іванець Г.В., Іванець М.Г., Матухно В.В., Толкунов І.О., Стецюк Є.І., Попов І.І. Формалізована математична модель прогнозування надзвичайних ситуацій та можливих завдань збитків внаслідок них // *Системи управління, навігації та зв'язку*. Полтава: ПНТУ, 2020. Вип. 4(62), 92–97.

Received (Надійшла) 29.01.2021

Accepted for publication (Прийнята до друку) 28.04.2021

**Formalized mathematical model of compatible forecasting and ensuring readiness for emergency situation response**

H. Ivanets, M. Ivanets, I. Tolkunov, I. Popov

**Abstract. Topicality.** At present, emergency prevention should be seen as a complex, combined process of predicting emergencies and responding in advance to threats or mitigation. **Goal.** Development of a formalized mathematical model of joint emergency forecasting and ensuring emergency preparedness. **Method.** The formalized mathematical model of joint forecasting and ensuring the readiness to respond to emergencies is a system of analytical dependencies, which together allow to solve the problem of research. It implements the principle of a systematic approach to solving the problem of emergency prevention in order to prevent their occurrence or minimize the possible consequences. Emergency prevention is a complex systemic process related to the analysis of emergency threats, their forecasting and ensuring the readiness of civil defense units to respond. **Results.** A formalized mathematical model of joint forecasting and ensuring emergency response preparedness and a control algorithm that implements the developed mathematical model have been developed. The formalized mathematical model of joint forecasting and emergency preparedness is a combination of two interrelated models: the emergency forecasting model and the possible damage caused by them, and the emergency preparedness model. **Conclusions.** Formalized mathematical model of joint forecasting and emergency preparedness includes mathematical models of emergency forecasting by nature, types, levels and possible consequences as a result of them both in the state as a whole and in its regions; mathematical models for assessing the potential technical capacity and readiness of units to perform tasks as assigned, optimal allocation of resources to ensure the readiness of units, optimization of territorial structures of civil defense, cost forecasting, technical and human support for emergencies. The obtained results of the research are the foundation for substantiation of organizational and technical measures for adequate response to emergencies of different nature in real conditions.

**Keywords:** formalized mathematical model, control algorithm, emergency situation, losses from emergencies, level of readiness.