

MATHEMATICS

Моделювання задачі розміщення ресурсів для ліквідації надзвичайної ситуації

І. А. Чуб¹, М. В. Новожилова², Ю. В. Михайловська¹, Р. В. Гудак³

¹Національний університет цивільного захисту України, м. Харків

²Харківський національний університет міського господарства ім. О.М. Бекетова, м. Харків, Україна

³Управління ДСНС України в Закарпатській області

*Corresponding author. E-mail: m.novozhilova04@gmail.com

Paper received 22.12.19; Accepted for publication 30.12.19.

<https://doi.org/10.31174/SEND-NT2019-215VII26-08>

Анотація. Статтю присвячено побудові узагальненої оптимізаційної моделі задачі розміщення ресурсів для ліквідації надзвичайної ситуації природного або техногенного характеру з урахуванням її тяжкості. Передбачається наявність як стаціонарних пунктів розміщення ресурсів, так і множини мобільних центрів допомоги. За постановкою задача, що розглядається, може бути сформульована як задача розміщення геометричних об'єктів зі змінними метричними характеристиками. Наведено алгоритм розв'язання задачі розміщення ресурсів.

Ключові слова: планування, ліквідація надзвичайної ситуації, ресурсозбереження, покриття, змінні метричні характеристики, розміщення.

Вступ. Надзвичайні ситуації (НС) природного та техногенного характеру – це стан певної території, що склався в результаті реалізації несприятливих обставин, аварій, природної або техногенної катастрофи, внаслідок чого спостерігаються значні матеріальні збитки, ушкодження здоров'я і навіть загибель людей. За даними Організації Об'єднаних Націй у світі практично щотижня виникає надзвичайна ситуація природного та техногенного характеру катастрофічного масштабу, у ліквідації якої приймають участь міжнародні служби порятунку. Ліквідація НС та мінімізація її наслідків – це операція, що потребує значної кількості різноманітних ресурсів, основним з яких є час ліквідації, та носить яскраво визначений соціальний ефект. Задача ускладнюється таким факторами, як загалом просторова розподіленість НС, недосконалість транспортної інфраструктури постраждалої території, терміновість доставки певних вантажів невідкладної допомоги та обладнання щодо ліквідації наслідків НС, експлуатація якого може ускладнюватися погодними умовами.

Ще одним фактом, на який потрібно зважати, є обмежений час прийняття управлінського рішення щодо розгортання ресурсів для ліквідації НС. Час, масштаб, та місце виникнення НС – величини ймовірнісного характеру, тому вкрай актуальним є наявність відповідних інформаційних технологій, що в режимі реального часу дозволяють визначити оптимальний план дій. Ці проблеми набувають сьогодні особливого значення в умовах реформування економіки України, жорстких обмежень на наявні ресурси територіальних підрозділів Державної служби з надзвичайних ситуацій (ДСНС) України, в зону відповідальності кожного з них входить підтримка регламентованого рівня безпеки у скінченій множині \wp населених пунктів $\wp = \{\wp_1, \wp_2, \dots, \wp_I\}$. В разі виникнення НС природного та техногенного характеру ці населені пункти стануть центрами (реципієнтами) надання допомоги, постачання медикаментів тощо. Зважаючи на просто-

рору розподіленість множини \wp , необхідно передбачити можливість розгортання тимчасових мобільних центрів допомоги, що можуть включати польові шпиталі, майстерні, сховища палива тощо з метою надання невідкладної першої допомоги та проведення рятувальних дій.

Короткий огляд публікацій. Етап стратегічного та оперативного планування оптимального розподілу ресурсів щодо ліквідації надзвичайної ситуації та мінімізації її наслідків включає такі взаємопов'язані задачі, як визначення транспортних маршрутів доставки вантажів у зону ураження, так і розміщення оптимальної кількості МДЦ, максимально наближених до зони НС. Ці задачі викликають неабиякий інтерес дослідників. В роботі [1] розглядається проблема визначення потреби у ресурсах щодо ліквідації наслідків НС у ураженій зоні і для її розв'язання запропоновано двофазну оптимізаційну модель цілочисельного програмування.

В роботі [2] проведено дослідження задачі доставки вантажів щодо ліквідації НС, яка включає визначення типів транспортних засобів і відповідних транспортних маршрутів в умовах зовнішнього середовища НС, що швидко змінюється, особливо у перші години після події. В цей період часу виникає необхідність у значній номенклатурі товарів першої необхідності, ліків, медичного обладнання. Тому жорсткі часові та інші обмеження виводять задачу доставки вантажів, що розглядається, за рамки класичної транспортної задачі. В роботах [3, 4] показано, що задача доставки вантажів в умовах НС є NP-важкою, багатокритеріальною, і для її розв'язання пропонується низка евристичних методів, що ґрунтуються на комбінованій схемі, яка містить засоби імітаційного моделювання та еволюційні алгоритми.

Дана робота продовжує дослідження в розвитку одного з перспективних підходів до моделювання та розв'язання задач оптимального розподілу ресурсів, а саме як оптимізаційних геометричних задач покриття [5 – 6].

В роботі [6] розвивається підхід, в рамках якого задачу покриття потреби в ресурсах під час ліквідації наслідків надзвичайної ситуації природного та техногенного характеру, що є просторово-розподіленою, зведено до задачі розміщення геометричних об'єктів з урахуванням стану транспортних мереж території. Загалом задачі покриття є детермінованими, в рамках цієї парадигми екзогенні параметри задачі розміщення визначаються точно. Тим не менш, характерною ознакою задачі планування оптимального розподілу ресурсів щодо виконання операцій з ліквідації наслідків НС є невизначеність типів та обсягів необхідних критичних ресурсів. Причому ця невизначеність генерується як заздалегідь невідомими параметрами (місцем розташування, рівнем тяжкості, типом) надзвичайної ситуації, так і погодними умовами під час НС, рівнем оснащення та швидкістю реагування територіальних рятувальних підрозділів.

В залежності від цих та інших факторів потреба в ресурсах для кожної з визначених операцій з ліквідації наслідків НС теж стає ймовірнішим або невизначеним фактором. В термінах задач розміщення такі операції моделюються як геометричні об'єкти зі змінними метричними характеристиками [6].

Однак в цих та інших дослідженнях практично не враховується рівень тяжкості НС, що на практиці може значно вплинути на результуючу оцінку необхідних ресурсів. Тому окреслене питання потребує подальшого ґрунтовного вивчення.

Мета – побудова оптимізаційної математичної моделі і методу розв'язання задачі планування розподілу ресурсів щодо ліквідації просторово-розподіленої НС та її наслідків як задачі розміщення геометричних об'єктів зі змінними метричними характеристиками в заданій області розміщення з урахуванням рівню тяжкості НС техногенного або природного характеру.

Результати та їх обговорення. Для побудови математичної моделі планування розподілу ресурсів щодо ліквідації просторово-розподіленої НС як задачі розміщення геометричних об'єктів зі змінними метричними характеристиками необхідно формалізувати інформацію $I = I_1 \cup I_2 \cup I_3$ щодо:

- I_1 : параметрів можливої НС;
- I_2 : параметрів ураженої території;
- I_3 : параметрів територіальних підрозділів ДСНС України.

Очевидно, інформація I є змішаною, різномірною, певні її кванти безпосередньо припускають чисельне подання, процедура оцінки інших квантів потребує застосування апарату експертних оцінок.

Розглянемо визначені складові процесу моделювання окремо.

Параметри можливої НС – інформація типу I_1 .

Зважаючи на аналіз, проведений в [2], виділимо такі параметри можливої НС:

$$I_1 = \{ \tau, \mathfrak{Z}_1, \mathfrak{Z}_2, \mathfrak{Z}_3 \},$$

де τ – час виникнення НС, кортеж \mathfrak{Z}_1 визначає тип географічної локації: степ, гірська місцевість, пересічена місцевість і координати $v=(x,y)$ центру (місця виникнення) НС; \mathfrak{Z}_2 – це тип НС: {хімічна, радіаційна, біологічна, змішана...}, (повінь, землетрус, лісова пожежа); \mathfrak{Z}_3 – рівень НС за тяжкістю втрат.

Тип географічної локації впливає на оцінку часу доставки вантажів, одним із підходів до визначення шкали оцінювання та рівня такого впливу є формалізація на основі експертних оцінок.

Окреме питання виникає при моделюванні параметру \mathfrak{Z}_3 – рівню НС за тяжкістю втрат. В залежності від обраного типу процедури формалізації рівень \mathfrak{Z}_3 НС за тяжкістю втрат може бути виражений як функція часу t ліквідації НС: $\mathfrak{Z}_3 = \mathfrak{Z}_3(t)$ або як функція витрат на ліквідацію НС: $\mathfrak{Z}_3 = \mathfrak{Z}_3(s)$, де s – сумарна грошова оцінка вартості ресурсів для ліквідації НС та наслідків НС, $\mathfrak{Z}_3 \in (0,1)$.

При цьому відмітимо, що на етапі стратегічного планування, коли мова йде про параметри ймовірної, гіпотетичної НС, є можливість проводити структурну і параметричну ідентифікацію функції витрат \mathfrak{Z}_3 (лінійна, квадратична, логістична), але під час оперативного планування, коли НС вже сталась, більш прийнятним є застосування спрощеної схеми моделювання рівню тяжкості втрат як кусково-лінійної функції, що моделює рівні {«низький»: $\mathfrak{Z}_3 < 0,3$, «середній»: $0,3 \leq \mathfrak{Z}_3 < 0,7$, «високий» $0,7 \leq \mathfrak{Z}_3 \leq 1$ }, нормованої найбільшим відомим обсягом втрат від НС визначеного типу у даній географічній локації.

Параметри ураженої території – інформація типу I_2 [6].

Територія S , що є об'єктом захисту, моделюється замкненим багатокутником (рис 1), метричні характеристики якого задані координатами вершин $w_n^S = (x_n^S, y_n^S)$, $n=1,2,\dots, N^S$ у загальній системі координат.

Вектор $w = \{ (x_1^p, y_1^p), (x_2^p, y_2^p), \dots, (x_l^p, y_l^p) \}$ задає параметри розміщення множини \wp населених пунктів у загальній системі координат.

Геометричною моделлю об'єктів \wp_i є однойменний замкнений опуклий багатокутник \wp_i , вершини якого задані у власній системі координат. Кожен пункт у разі виникнення НС певного типу генерує запит (однойменний кортеж) \wp_i щодо обсягу необхідних вантажів. Вважатимемо, що значення кортежів запитів \wp_i не залежать від відстані до центру НС.

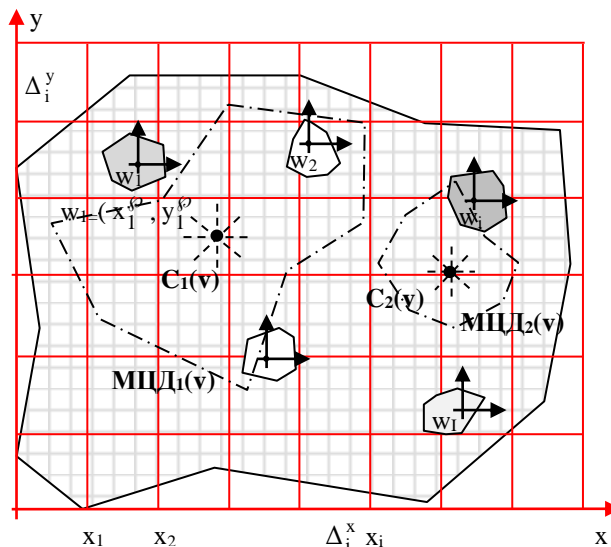


Рис. 1. Область та об'єкти розміщення

Значення характеристик $I_1 \cup I_2$ впливають на параметри ураженої зони, а також формують багатofакторну потребу $\Omega(\mathfrak{T}_3) = \{\Omega_1(\mathfrak{T}_3), \Omega_2(\mathfrak{T}_3), \dots, \Omega_J(\mathfrak{T}_3)\}$ у відповідних ресурсах територіальних підрозділів ДСНС України для ліквідації НС.

Параметри територіальних підрозділів ДСНС України: – інформація типу I_2 .

Розширимо подання інформації типу I_2 в порівнянні з [10] наступним чином.

Визначимо, що територіальні підрозділи ДСНС України мають стаціонарні бази в певних (можливо, не всіх) населених пунктах $\hat{\wp} \subseteq \wp$ території, що розглядається. На рис. 1 такі пункти позначені відтінками сірого кольору, більш інтенсивний колір означає більшу потужність \hat{h} відповідного підрозділу ДСНС України. Потужність \hat{h}_g локації $\hat{\wp}_g, g=1,2,\dots,G$, є векторною величиною: $\hat{h}_g = \{\hat{h}_{g1}, \hat{h}_{g2}, \dots, \hat{h}_{gJ}\}$.

У випадку, коли сумарна потужність (або, якщо це є прийнятним, потужність на одиницю площі ураженої території) не відповідає потребі Ω (у абсолютному вимірі або нормованому на одиницю площі), виникає необхідність формування мобільних центрів допомоги (МЦД).

Кількість K МЦД, вектор координат розміщення МЦД $v = \{v_1, \dots, v_k, \dots, v_K\} = \{(x_1, y_1), \dots, (x_k, y_k), \dots, (x_K, y_K)\}$ та потужність \mathfrak{N}_k МЦД є шуканими параметрами задачі планування ресурсів.

Відносно геометрії ураженої зони визначальним параметром k -го МЦД є просторовий розподіл потужності P_k , що визначається через відстань до найвіддаленішої точки території S , яку за регламентом можна віднести до зони впливу цього МЦД.

$P_k(v_k)$ є функцією рельєфу місцевості, характеристик під'їзних шляхів та наявних транспортних засобів і змінюється згідно розташування k -го МЦД.

Просторовий розподіл P_k апроксимують восьмикутником C_m , орієнтованим за сторонами світу.

Зауваження 1. Багатокутник C_m є геометричний об'єкт у загальному випадку із змінними метричними характеристиками та просторовою формою. В залежності від параметрів розміщення центру C_m на території S , тобто в залежності від взаємного розташування C_m та реципієнтів допомоги \wp_i ; координати вершин (x_ζ^m, y_ζ^m) , $\zeta=1,2,\dots,n_m$, багатокутника C_m у власній системі координат змінюються. Відповідно, змінюється аналітичний опис багатокутника C_m .

Параметри розміщення об'єкта C_m збігаються з параметрами розміщення $v_m = (x_m, y_m)$ m -го МЦД.

На етапі оперативного планування передбачається розв'язання низки оптимізаційних задач стосовно розгортання мережі МЦД.

Задача 1. Визначення відповідності ресурсів стаціонарних баз територіальних підрозділів ДСНС України запитам уражених зон на відповідні ресурси та дії територіальних підрозділів у разі виникнення НС техногенного або природного характеру.

Задача 2. Визначити параметри оптимального розміщення множини МЦД визначеної потужності на ураженій території S , що потерпає від НС природного

або техногенного характеру з урахуванням тяжкості НС, що сталась.

Розв'язання Задачі 1 безпосередньо пов'язане із визначенням обсягу недостатніх ресурсів, за якими необхідно звертатися до підрозділів ДСНС України вищого рівня ієрархії.

Задача 1 припускає таку декомпозицію:

Задача 1.1 Визначення вектору незадоволеної потреби $\tilde{\Omega}(\mathfrak{T}_3) = \{\tilde{\Omega}_{11}(\mathfrak{T}_3), \dots, \tilde{\Omega}_{ij}(\mathfrak{T}_3), \dots, \tilde{\Omega}_{IJ}(\mathfrak{T}_3)\}$ та вектору надлишкових ресурсів $\bar{h}_g = \{\bar{h}_{g1}, \bar{h}_{g2}, \dots, \bar{h}_{gJ}\}$ стаціонарних баз. В результаті розв'язання задачі 1 формуються дві підмножини об'єктів: $\wp^* = \{\wp_1^*, \dots, \wp_{I_1}^*\}$, потребу яких ресурсах задоволено повністю, та $\wp = \{\wp_1, \dots, \wp_{I_2}\}$, що потребують допомоги: $I_1 + I_2 = I$.

Задача 1.2 Забезпечення потреби $\tilde{\Omega}(\mathfrak{T}_3)$ внутрішніми резервами території:

$$\sum_{g=1}^G \sum_{i=1}^{I_2} \sum_{j=1}^J c_{gij} x_{gij} \rightarrow \min, \quad (1)$$

за умов: $\sum_{i=1}^{I_2} x_{gij} \leq \bar{h}_{gj},$

$$\sum_{j=1}^J x_{gij} \leq \tilde{\Omega}_{gi}, \quad j=1,2,\dots,J; i=1,2,\dots,I_2; g=1,2,\dots,G.$$

У випадку якщо в результаті розв'язання задачі 1 вектор

$$\tilde{\Omega}(\mathfrak{T}_3) = \{\tilde{\Omega}_{11}(\mathfrak{T}_3), \dots, \tilde{\Omega}_{ij}(\mathfrak{T}_3), \dots, \tilde{\Omega}_{IJ}(\mathfrak{T}_3)\}$$

має ненульові компоненти, переходимо до розв'язання Задачі 2.

Математична модель Задачі 2 є такою:

$$\min_{v \in D \subset E^{2M}} \sum_{m=1}^M \sum_{n=m+1}^M [\omega_{mn}(v_m, v_n) + \omega_m^S(0, v_m)], \quad (2)$$

де область допустимих значень D задається умовою $\cup_{i=1}^{I_2} \wp_i \subset \cup_{m=1}^M C_m$, функція $\omega_{mn}(v_m, v_n)$ визначає площу області взаємного перекриття об'єктів (C_m, C_n), функція $\omega_m^S(0, v_m)$ визначає площу області взаємного перекриття об'єктів C_m та $cl(E^2/S)$, $m,n=1,2,\dots,M$, $m \neq n$.

Оптимізаційна задача покриття (2) формулюється як задача розміщення геометричних об'єктів зі змінними метричними характеристиками у просторі параметрів розміщення об'єктів S вигляду:

$$M(v) \rightarrow \min_{v \in D}, \quad (3)$$

де область D визначається обмеженнями:

$$\text{Зони впливу } C_m \text{ мають відповідати умовам взаємного неперетину: } clC_m \cap clC_j = \emptyset; \quad (4)$$

$$\text{Кожний населений пункт } \wp_i, i=1,2,\dots, I_2, \text{ має належати одній із зон } C_m: \wp_i \cap clC_m = \wp_i; \quad (5)$$

$$\text{Зона впливу } C_m \text{ може частково не належати області } S: C_m \cap E^2/S \neq \emptyset; \quad (6)$$

Крім того, необхідно зважати на наявність так званих заборонених зон розміщення, тобто наявність об'єктів $\varphi_i, i=1,2,\dots,I_1$, для яких виконується умова:

$$\varphi_i \cap clC_m = \emptyset. \quad (7)$$

Алгоритм розв'язання задачі, оснований на стратегії послідовно-поодинокого розміщення, за умови розбиття області S рівномірною сіткою з n_m комітками $\{\Delta^x, \Delta^y\}$ так, що у межах кожної комітки (якщо $v_m \in \{\Delta_i^x, \Delta_j^y\}$) форма та метричні характеристики об'єктів C_m є сталими:

$$x_k^m = x_k^m(\Delta_i^x, \Delta_j^y), y_k^m(\Delta_i^x, \Delta_j^y), k=1,2,\dots,n_m,$$

і що дозволяє провести певну редукцію задачі, яка є прийнятною на етапі оперативного планування, містить такі етапи:

1. Завдання переставлення номерів населених пунктів: $\varphi_i, i=1,2,\dots,I_2$. Упорядкування проводиться за принципом «найближчого сусіди», починаючи з, наприклад із південно-західного пункту.

2. Визначення місця розташування m -го МЦД із зоною впливу C_m .

Це ітераційна задача вигляду

$$(x_m^*, y_m^*) = \arg \min_{v_m \in S} \max_{i \in I^-, j \in I_1} f_m^S(x_m, y_m, x_{ji}^{\varphi}, y_{ji}^{\varphi})$$

де множина I^- – множина індексів об'єктів φ_i що є не охопленими певною зоною впливу.

Формування множини індексів I^m об'єктів φ_i , що є охопленими m -ю зоною впливу.

Критерій останову алгоритму є таким: $\bigcup_m I^m = I_2$.

Висновки. Представлено подальший розвиток моделювання та розв'язання задачі покриття потреби в ресурсах в постраждалих населених пунктах під час ліквідації наслідків просторово-розподіленої надзвичайної ситуації природного та техногенного характеру.

Проведено параметричну ідентифікацію математичної моделі основної задачі дослідження та її декомпозицію, побудовано етапи розв'язання задачі. У подальшому передбачається здійснити формалізацію множини параметрів задачі із застосуванням теорії нечітких множин.

ЛІТЕРАТУРА

1. Sebatli A. F., Cavdur, Kose-Kucuk M. Determination of relief supplies demands and allocation of temporary disaster response facilities // Transportation Research Procedia, 2017, № 22, pp. 245–254.
2. Zheng, Y.J., Ling H.F. Emergency transportation planning in disaster relief supply chain management: A cooperative fuzzy optimization approach // Soft Comput. – 2013. – 17. – pp.1301–1314.
3. Zhang M.-X., Zheng Yu.-J., Zhang B. Bio-Inspired Meta-Heuristics for Emergency Transportation Problems // Algorithms, 2014, № 7, pp. 15-31.
4. Berkoune D., Renaud J., Rezik M., Ruiz A. Transportation in disaster response operations // Soc. Ecol. Plan. Sci, 2012, № 46, pp. 23–32.
5. Романова Т.Е., Кривуля А.В., Злотник М.В. Математическая модель и метод решения задачи покрытия многоугольной области прямоугольными объектами // Проблемы машиностроения, 2008, №3, С. 58–68.
6. Чуб І.А., Новожилова М.В., Михайловская Ю.В., Гудак Р.В. Розв'язання задачі покриття потреби в ресурсах при ліквідації надзвичайних ситуацій // Радіоелектроніка і інформатика, 2019, № 1, с.64-70.

REFERENCES

1. Sebatli, A., Cavdur, F., Kose-Kucuk, M. () Determination of relief supplies demands and allocation of temporary disaster response facilities, Transportation Research Procedia, 2017, No 22, 245–254.
2. Zheng, Y.J., Ling, H.F. Emergency transportation planning in disaster relief supply chain management: A cooperative fuzzy optimization approach // Soft Comput., 2013, No 17, pp.1301–1314.
3. Zhang, Min-Xia, Zhang, Bei, and Yu-Jun Zheng Bio-Inspired Meta-Heuristics for Emergency Transportation, Algorithms, 2014, No 7, pp.15-31.
4. Berkoune, D., Renaud, J., Rezik, M., Ruiz, A. Transportation in disaster response operations, Soc. Ecol. Plan. Sci., 2012, No 46., pp. 23–32.
5. Romanova, T.E., Krivylyya, A.B., and Zlotnik, M.B. Mathematical model and solving method for covering problem of a polygonal area with rectangular objects, Problems of Mechanical Engineering, 2008, №3, p. 58–68.
6. Chub I.A., Novozhylova M.V., Mikhailovskaya Y.V., Gudak R.V. Solving the problem of coverig the need in resources in emergency liquidation // Radio Electronics and Informatics, 2019, № 1, pp. 64-70.

Modeling resource allocation problem for emergency response

I. A. Chub, M. V. Novozhylova, Y. V. Mikhailovskaya, R. V. Gudak

Abstract. The paper is devoted to the constructing a generalized optimization model of the problem of resource allocation for elimination of natural or man-made emergency taking into account its gravity. Both fixed landing points and many mobile help centers are envisaged. The problem under consideration can be formulated as a problem of placing geometric objects with variable metric characteristics. An algorithm for solving the resource allocation problem is given.

Keywords: *planning, emergency management, resource saving, coverage, variable metric, placement.*