

УДК 629.5.083.8
DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.3.2/34>

Трофименко І.В.

Дунайський інститут водного транспорту
Державного університету інфраструктури та технологій

Урум Н.С.

Дунайський інститут водного транспорту
Державного університету інфраструктури та технологій

Пліта Л.Л.

Дунайський інститут водного транспорту
Державного університету інфраструктури та технологій

Іваненко В.М.

Дунайський інститут водного транспорту
Державного університету інфраструктури та технологій

МЕТОДИКА ОЦІНКИ ЕФЕКТИВНОСТІ ПОШУКОВО-РЯТУВАЛЬНОЇ ОПЕРАЦІЇ НА МОРІ НА ОСНОВІ ВИКОРИСТАННЯ ЛІНГВІСТИЧНИХ ЗМІННИХ НЕЧІТКИХ МОДЕЛЕЙ

Метою статті є удосконалення методики оцінки ефективності пошуково-рятувальної операції на морі на основі використання лінгвістичних змінних нечітких моделей, що дозволяє отримувати прийнятний результат в умовах обмежених вихідних даних. Поставлена мета досягається шляхом визначення ймовірнісних подій різних видів діяльності сил і засобів пошуково-рятувальної операції як незалежними та спільними між собою, зважаючи на їхнє часове розташування. При цьому, по-перше, потрібно провести розрахунки ймовірностей для різних видів діяльності сил і засобів пошуково-рятувальної операції незалежно один від одного з метою визначення ймовірності виникнення несприятливих наслідків. По-друге, для цих розрахунків пропонується використовувати нечіткі експертні оцінки рівня впливу несприятливих факторів замість ваг як поправочних коефіцієнтів. Цей підхід дозволяє використовувати багатозначні вербальні оцінки замість бінарних оцінок несприятливих факторів, які можуть бути недостатньо точними. У третьому кроці здійснюється розрахунок ймовірностей для різних видів діяльності сил і засобів пошуково-рятувальної операції з використанням цих нечітких експертних оцінок. Таким чином визначено, що використання нечітких експертних оцінок впливу негативних факторів на продуктивність робочих процесів та їх реалізація може бути способом вирішення ключових проблем наявної методики оцінювання ефективності пошуково-рятувальної операції. Ці проблеми містять недостатній рівень диференціації впливу більшості негативних факторів, неоднозначність методики в різних умовах та недостатню кількість контрольних даних. Запропонований підхід, який використовує лінгвістичні змінні та визначає їх терм-множини, дозволяє отримувати чіткі оцінки рівня впливу негативних факторів на продуктивність робочих процесів. Найбільш суттєвим результатом є введення евристичної реалізації з мінімальними терм-множинами та трикутними функціями належності лінгвістичних змінних, що дозволяє отримувати задовільний результат в умовах обмежених вихідних даних. Подальшим напрямом роботи є розвиток методів оцінювання ефективності пошуково-рятувальної операції з більш гнучким врахуванням впливу негативних факторів, наприклад, створення системи нечіткого виведення.

Ключові слова: нечітка оцінка, лінгвістична змінна, несприятливий фактор, зовнішній вплив, пошуково-рятувальна операція.

Постановка проблеми. Безпека на морі має величезне значення, тому практично всі морські держави мають затверджені на державному рівні плани пошуку та рятування (SAR) [1; 2]. Ці заходи є важливими та витратними, тому велика увага приділяється їх ефективності. У роботі розглянуто підхід щодо удосконалення методики оцінки ефективності пошуково-рятувальної операції

(ПРО) з використанням методів штучного інтелекту, а саме нечітких моделей. Методика, що удосконалюється, розроблена для визначення ефективності системи ПРО в залежності від кількості аварійних об'єктів, що перебувають у районі проведення ПРО [1]. Ця ефективність визначається як ймовірність надання допомоги заданій кількості аварійних об'єктів, а результуючу ефективність системи ПРО розраховують за сукупністю всіх можливих випадків з урахуванням їхньої ймовірності. Оцінка ефективності ПРО в кожному конкретному випадку базується на ймовірності надання допомоги аварійним об'єктам без урахування зовнішніх впливів, а потім коригується ймовірністю негативних зовнішніх впливів на перебіг ПРО. Для вибору найефективнішого варіанту ПРО потрібно адекватно оцінювати ймовірність надання допомоги у кожному випадку.

У методиці розглядаються несприятливі зовнішні впливи на перебіг ПРО, які вважаються попарно незалежними та спільними ймовірнісними подіями, такими як гідрометеорологічні та фізико-географічні умови, а також несприятливі технічні чинники, такі як невідповідність характеру аварії тактико-технічним можливостям рятувального загону, технічний стан рятувальних суден і засобів рятування та їхній ступінь надійності. Таким чином, ймовірність P_{AEI} врахування несприятливих зовнішніх впливів на перебіг ПРО визначається таким виразом:

$$P_{AEI} = P_{AEN} + P_{ATF} - P_{AEN}P_{ATF}, \quad (1)$$

де P_{AEN} – ймовірність несприятливого впливу гідрометеорологічних і фізико-географічних умов;

P_{AEN} – ймовірність впливу несприятливих технічних факторів. Ймовірність цих несприятливих зовнішніх впливів залежить від властивих їм несприятливих чинників, що знижують ефективність ПРО, які також приймають попарно незалежними.

Для більш об'єктивного врахування в методиці несприятливим чинникам присвоюються певні ваги залежно від очікуваного ступеня їхнього впливу на кінцевий результат пошуку аварійних об'єктів, переходу до району аварійних об'єктів і виконання завдань ПРО в районі аварійних об'єктів, які розглядаються як види діяльності сил і засобів ПРО. Саме ці ваги виконують роль поправочних коефіцієнтів урахування різних відхилень реальних умов від ідеалізованих, описаних математичною моделлю (графічно сутність методики відображено на рис. 1).

Методика не вказує, яку умовну вагу слід застосовувати для сил та засобів пошуково-ряту-

вальної операції при малій видимості, але використання різних значень може призвести до неоднозначних результатів. Крім того, відсутність градацій несприятливих умов, які можуть знизити ефективність ПРО, також впливає на точність оцінки результатів. Це зумовлено нерозрахунковим характером таких умов. Однак, вирішити ці проблеми тільки за допомогою запропонованої методикою коригування, розширення та доповнення або розширення дерева (рис. 1) з умовними вагами на основі результатів спеціальних навчань сил ПРО неможливо.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Питанням підвищення ефективності пошуково-рятувальної операції присвячена значна кількість як наукових досліджень так і нормативних документів. Наприклад, в національному плані SAR США акцентується на необхідності максимального використання всіх можливих ресурсів та співпраці для забезпечення ефективних пошуково-рятувальних операцій, мінімізації ризиків та збереженні максимальної кількості життів [2].

Постійно розвиваються техніки підвищення ефективності пошуку та рятування на морі. Наприклад, берегова охорона Великої Британії пропонує використовувати байєсівські мережі та бінарну логістичну регресію для моделювання надійності операцій [3]. У Канаді розроблено географічну систему підтримки прийняття рішень SARPlan, що допомагає оптимізувати планування пошукових місій для зниклих літаків. Модулі оптимізації системи базуються на теорії пошуку та градієнтному пошуку, і спрямовані на максимізацію ймовірності успіху місії та зниження експлуатаційних витрат. Використання таких підходів збільшує, наприклад, шанси на успішне знаходження загубленого літака і людей на його борту.

Використання емпіричних залежностей має важливу роль у багатьох галузях людської діяльності, і це не можна недооцінити. Суворі математичні моделі здатні лише описувати окремі аспекти реальних процесів, або їхні уявлення у вигляді ідеалізованих сценаріїв. Часто для врахування різних відхилень реальних умов від ідеалізованих, в таких моделях вводяться поправочні коефіцієнти або вирази на основі емпіричних даних.

Аналогічний підхід застосовується в оцінці ефективності ПРО, розглянутий в [1]. Ця методика розроблена відповідно до Концепції розвитку системи пошуково-рятувального забезпечення та її основні положення реалізовані в комплексі засобів автоматизації морської рятувальної

операції. У цій методиці ефективність системи ПРО визначається як частка аварійних об'єктів, яким була надана допомога силами ПРО внаслідок пошуково-рятувальних дій (ПРД), від загальної кількості аварійних об'єктів у районі. Ця методика дозволяє прогнозувати ефективність різних можливих (найбільш ймовірних) варіантів ПРД та вибирати найефективніший варіант.

Постановка завдання. Метою статті є удосконалення методики оцінки ефективності пошуково-рятувальної операції на морі на основі використання лінгвістичних змінних нечітких моделей, що дозволяє отримувати прийнятний результат в умовах обмежених вихідних даних.

Викладення основного матеріалу. Для досягнення мети пропонується припустити, що ймовірнісні події різних видів діяльності сил і засобів ПРО є незалежними та спільними між собою, зважаючи на їхнє часове розташування. Це означає, що можна позначити ймовірності несприятливих впливів при різних видах діяльності сил і засобів

ПРО – «пошук», «перехід» і «виконання». Отже, відповідно до виразу (1) та до дерева ваг (рис. 1) отримуємо такий вираз:

$$P_{AEI} = P_S + P_T + P_E - P_S P_T - P_S P_E - P_T P_E + P_S P_T P_E, \quad (2)$$

де P_S – ймовірність пошуку аварійних об'єктів;

P_T – ймовірність переходу в район аварійних об'єктів;

P_E – ймовірність виконання завдань ПРО.

Другим кроком є проведення розрахунків ймовірностей P_S, P_T, P_E для різних видів діяльності сил і засобів ПРО незалежно один від одного, наприклад, згідно з виразом (1), з метою подальшого обчислення P_{AEI} .

На третьому кроці для обчислення ймовірностей P_S, P_T, P_E для різних видів діяльності сил і засобів ПРО пропонується перейти від використання ваг як поправочних коефіцієнтів до використання нечітких експертних оцінок рівня впливу несприятливих факторів. Цей підхід дозволяє замість бінарних оцінок несприятливих факторів, які

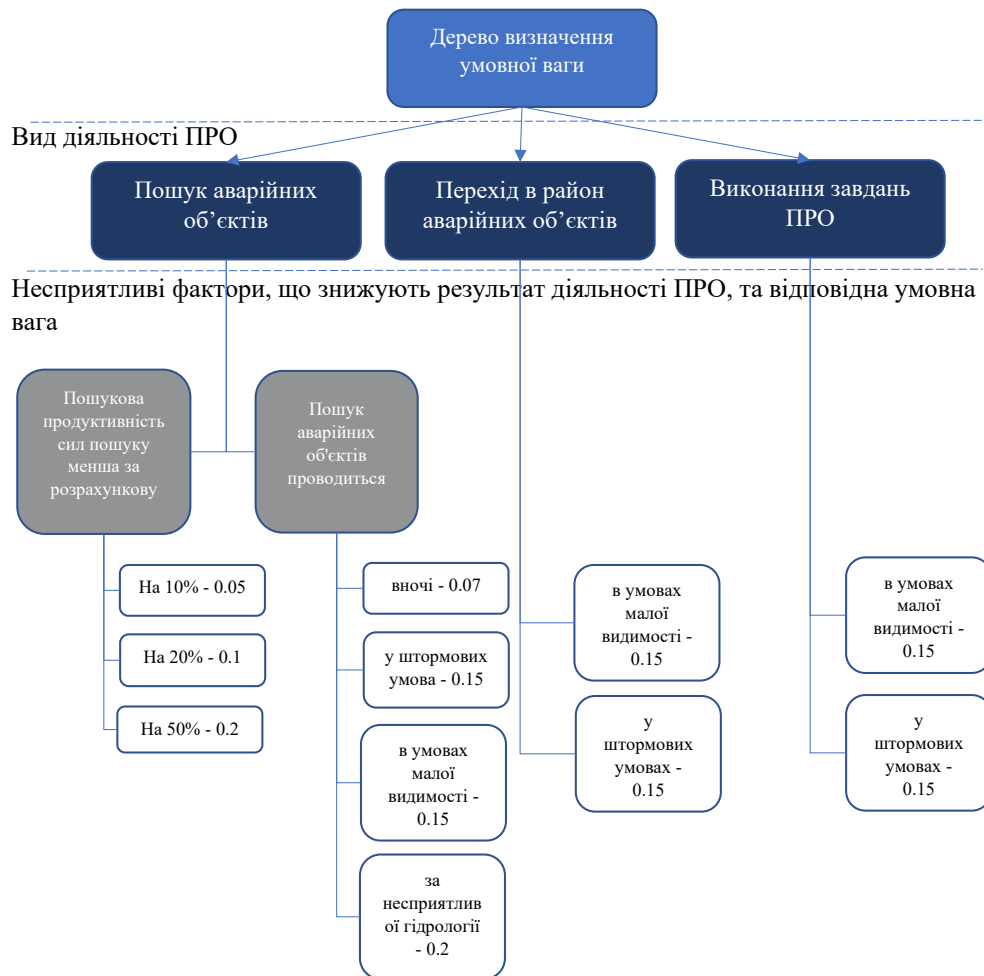


Рис. 1. Дерево визначення умовної ваги очікуваного ступеня впливу несприятливих факторів на ефективність ПРО

мають нерозрахунковий характер, використовувати багатозначні вербальні оцінки.

Для переходу до нечітких експертних оцінок згідно зі змістом дерева ваг (рис. 1), введемо лінгвістичні змінні впливу негативних факторів:

- 1) F1 – зниження пошукової продуктивності сил пошуку відносно розрахункової;
- 2) F2 – нічні умови;
- 3) F3 – штормові умови;
- 4) F4 – умови малої видимості;
- 5) F5 – несприятлива гідрологія.

Значення лінгвістичних змінних визначаються нечіткими множинами, які мають поіменовані значення і функції належності, що приймають значення в діапазоні від 0 до 1. Кожна лінгвістична змінна має свій перелік значень, який обмежується трьома або шістьма градаціями, оскільки людина зазвичай не може розрізнити більшу кількість градацій у словесних оцінках [4–8].

Функція належності $\mu(x)$ відображає персональну впевненість експерта відносно того, наскільки конкретне значення x базової шкали носія (яка є підмножиною універсуму, де функція приналежності завжди більша за 0) відповідає нечіткій множині, визначеній цією функцією. Універсум для значень лінгвістичних змінних, які визначають нечіткі множини, охоплює діапазон від 0 до 1, де значення інтерпретуються як очікуваний ступінь впливу відповідного несприятливого фактору з точністю не вище 0.01 (див. таблицю). Основний клас методів побудови функції належності полягає в експертній оцінці. Функція належності має природні властивості, такі як один максимум і гладкі фронти, які затухають до нуля [4–10].

В подальшому будемо використовувати умовні ваги, наведені на дереві ваг (див. рис. 1), як значення на базовій шкалі носія, для якої значення функцій приналежності відповідних лінгвістичних змінних, які відповідають вагам, будуть дорівнювати максимальному значенню 1, яке є нормалізованим значенням для функцій приналежності. Ці лінгвістичні змінні містять всі значення лінгвістичної змінної F1, значення «повністю нічні умови» для лінгвістичної змінної F2 та значення «складні», яке додається до імені відповідної лінгвістичної змінної, для всіх інших лінгвістичних змінних.

Після того, як функції приналежності лінгвістичних змінних визначені інженерами, що дозволяє експертам обрати значення впливу небажаних факторів у конкретних умовах ПРО, можна визначити ймовірності P_S, P_T, P_E для різних видів

діяльності сил і засобів ПРО. Для цього використовуються методи дефазифікації, які перетворюють нечіткі множини на відповідні чіткі значення в залежності від контексту завдання. Дефазифікація може виконуватися різними методами, такими як метод центру тяжіння композиції максимум-мінімум, метод медіани, метод ваг, або крайні максимуми. Вибір методу залежить від контексту завдання, а найбільш придатними методами є метод ваг, якщо експерт обрав однозначне значення лінгвістичних змінних, або метод медіани, якщо експерт вказав декілька значень. Важливо враховувати, що семантика операцій над нечіткими множинами сильно залежить від контексту.

Щоб повністю визначити значення лінгвістичних змінних впливів несприятливих чинників, необхідно визначити величини для значень лінгвістичних змінних, які не можна отримати безпосередньо з дерева ваг (див. рис. 1), а також визначити види функцій належності для всіх значень лінгвістичних змінних. У цьому контексті можна використовувати різні реалізації, проте їх оптимізація класичними методами, такими як мінімізація середньоквадратичної помилки, що виникає між заданими вихідними значеннями та значеннями нечіткої моделі, неможлива через недостатню кількість контрольних даних в даному контексті. Тому запропоновано використовувати евристичну реалізацію розглянутого нечіткого підходу.

У зв'язку з тим, що потік вихідних даних має невеликий обсяг, у роботі використовуються широко поширені трикутні функції приналежності, які є нормованими (з одиничним максимумом). Вони відрізняються простотою та наочністю у поєднанні з достатньою точністю даних. Вершини цих функцій визначаються максимальними значеннями на базовій шкалі носія. При визначенні меж основи функції належності, які затухають до нуля, будемо припускати, що за такої невеликої кількості градацій лінгвістичних оцінок те саме значення на базовій шкалі носія може належати не більше ніж до двох суміжних термів лінгвістичних змінних. Якщо побудувати функцію належності всіх термів лінгвістичних змінних за однаковими правилами, основи не повинні виходити за значення носія максимумів функції належності суміжних термів. Якщо значення носія перебуває між вершинами функції належності, то воно належить до обох суміжних термів лінгвістичних змінних, якщо значення носія основи співпадає з максимумом суміжних

термів. Якщо використовувати трикутні функції належності, то сума значень приналежностей для кожного значення носія нечіткої множини лінгвістичної змінної в області перетину термів буде дорівнювати одиниці.

Згідно з цією властивістю, графіки, які показують, як експерти вибирають значення лінгвістичних змінних, що впливають на небажані фактори, мають просту форму. Ширину основи

функції приналежності для крайніх термів лінгвістичних змінних встановлюють таким чином, що вона дорівнює ширині основи іншого терму тієї ж змінної, якщо немає суміжних термів. При цьому ліве значення основи лівого терма завжди має значення 0 на базовій шкалі. Графіки функцій належності для термів лінгвістичних змінних, які були побудовані за таким принципом, для оцінки ефективності ПРО наведено на рис. 2.

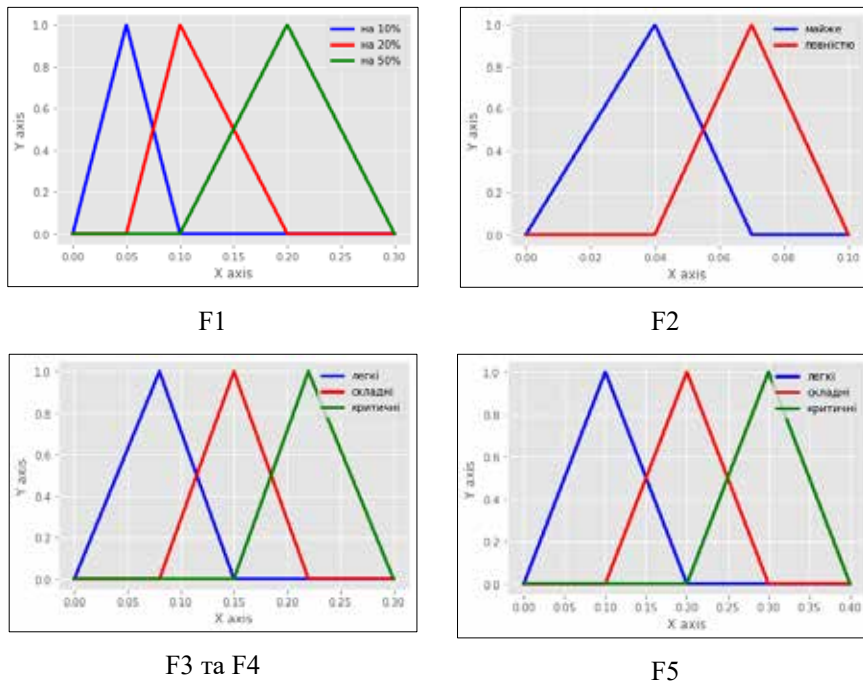


Рис. 2. Приклад функцій приналежності термів лінгвістичних змінних

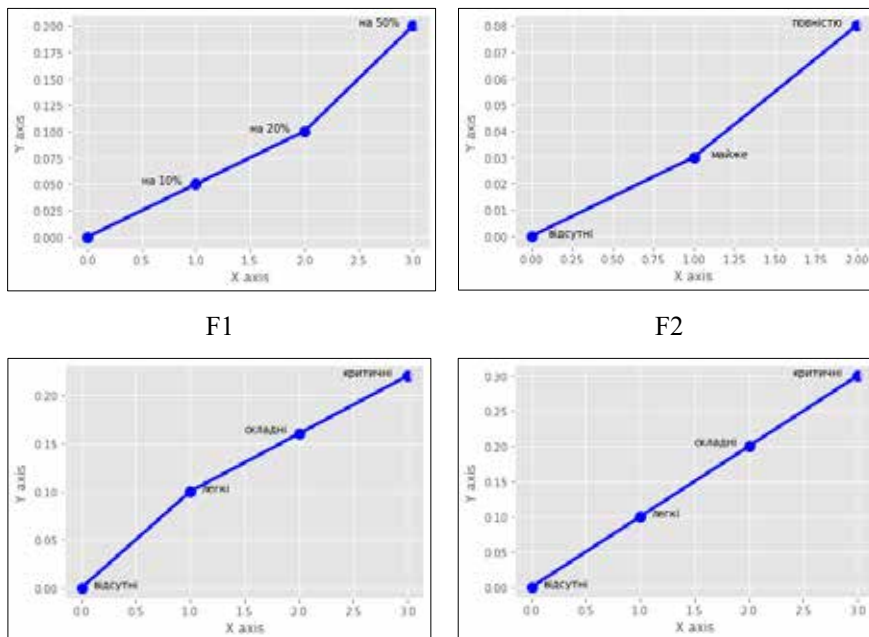


Рис. 3. Приклад дефазифікації експертних значень лінгвістичних змінних впливів несприятливих факторів

Ця особливість, яка полягає в тому, що для кожного значення носія в ділянці перетину значень лінгвістичних змінних сума значень приналежностей дорівнює одиниці, дозволяє легко візуалізувати експертний вибір значень лінгвістичної змінної шляхом графічної дефазифікації. Експертну оцінку очікуваного ступеня впливу відповідного несприятливого фактору на такому графіку можна позначити на вісі ординат, а значення лінгвістичних змінних можна розмістити на вісі абсцис в порядку зростання. Графік являє собою ламану лінію, яка з'єднує точки максимумів відповідних значень лінгвістичних змінних.

На рис. 3 показані графіки дефазифікації експертного вибору значень лінгвістичних змінних для оцінки ефективності ПРО.

Готові графіки дефазифікації експертних значень лінгвістичних змінних впливів несприятливих факторів дозволяють швидко отримувати чіткі оцінки рівня впливу цих факторів на лінгвістичну змінну для якісної оцінки ефективності ПРО.

Висновки. Використання нечітких експертних оцінок впливу несприятливих чинників на ефективність ПРО та їх реалізація є способом вирішення основних проблем наявної методики оцінювання ефективності ПРО, зокрема, недостатньої градації впливу більшості несприятливих чинників, неоднозначності методики в різних умовах, відсутності достатньої кількості контрольних даних тощо.

Запропонований підхід з використанням лінгвістичних змінних та визначенням їхніх термножин дозволяє отримувати чіткі оцінки рівня впливу несприятливих чинників на ПРО. Введення евристичної реалізації з мінімальними термножинами та трикутними функціями належності лінгвістичних змінних дозволяє отримувати прийнятний результат в умовах обмежених вихідних даних. Цей підхід може бути використаний як основа для подальшого розвитку методів оцінювання ефективності ПРО з більш гнучким врахуванням впливу несприятливих чинників, наприклад, створення системи нечіткого висновку.

Список літератури:

1. New Zealand Search and Rescue Council. The New Zealand Search and Rescue Strategic Plan 2017-2020. *Ministry of Transport*. URL: <https://nzsar.govt.nz/assets/Downloadable-Files/NZSAR-Strategic-Plan.pdf> (дата звернення: 01.05.2024).
2. National Search and Rescue Plan of the United States. URL: https://www.dco.uscg.mil/Portals/9/CG-5R/manuals/National_SAR_Plan_2016.pdf (дата звернення: 01.05.2024).
3. Norrington L., Quigley J., Russell A., Van der Meer R. Modelling the reliability of search and rescue operations with Bayesian Belief Networks. *Reliability Engineering & System Safety*. 2008. Vol. 93. Iss. 7. P. 940–949. DOI: 10.1016/j.ress.2007.03.006.
4. Zadeh L.A. Calculus of fuzzy restrictions. *Fuzzy Sets and Their Applications to Cognitive and Decision Processes* / ed. by Zadeh L.A. and al. New York: Academic Press, 1975. P. 1–41.
5. Zadeh L.A. Fuzzy logic and approximate reasoning. *Synthese*. 1975. Vol. 80. P. 407–428.
6. Zadeh L.A. A theory of approximate reasoning. *Machine Intelligence*. 1979, Vol. 9. P. 149–194.
7. Ruan D. Fuzzy logic and soft computing in nuclear engineering. *Proceedings of the Eighth International Fuzzy Systems Association World Congress, Taipei Taiwan, August 17-20 1999*. Vol. 1. P. 325–329.
8. Ruan D. Fuzzy logic and intelligent computing in nuclear engineering / ed. by L.A. Zadeh, J. Kacprzyk. *Computing with Words in Information/Intelligent Systems 2*. 1999. P. 567–585.
9. Kayiran B., Yazir D., Aslan B. Data-driven Bayesian network approach to maritime accidents involved by dry bulk carriers in Turkish search and rescue areas. *Regional Studies in Marine Science*. 2023 Vol. 67. 103193. DOI: 10.1016/j.rsma.2023.103193.
10. Dabrowski J.J., Beyers C., de Villiers J.P. Systemic banking crisis early warning systems using dynamic Bayesian networks. *Expert Systems with Applications*. 2016. Vol. 62. P. 225–242.

Trofymenko I.V., Urum N.S., Plita L.L., Ivanenko V.M. A METHODOLOGY FOR EVALUATING THE EFFECTIVENESS OF A SEARCH AND RESCUE OPERATION AT SEA BASED ON THE USE OF LINGUISTIC VARIABLES OF FUZZY MODELS

The aim of the article is to improve the methodology for evaluating the effectiveness of a search and rescue operation at sea based on the use of linguistic variables of fuzzy models, which allows obtaining an acceptable result in the conditions of limited initial data. This goal is achieved by determining the probabilistic events of various types of activities of search and rescue forces and means as independent and joint, considering their temporal location. In this case, firstly, it is necessary to calculate the probabilities for different types of activities of the search and rescue forces and means independently of each other to determine the probability of adverse consequences. Secondly, it is proposed to use fuzzy expert estimates of the level of impact of adverse

factors instead of weights as correction factors for these calculations. This approach allows for the use of multi-valued verbal assessments instead of binary assessments of adverse factors that may not be accurate enough. In the third step, probabilities are calculated for different types of activities of search and rescue forces and means using these fuzzy expert estimates. Thus, it has been determined that the use of fuzzy expert assessments of the impact of negative factors on the productivity of work processes and their implementation can be a way to solve the key problems of the existing methodology for assessing the effectiveness of a search and rescue operation. These problems include an insufficient level of differentiation of the impact of most negative factors, the ambiguity of the methodology in different conditions, and an insufficient amount of control data. The proposed approach, which uses linguistic variables and defines their term sets, allows obtaining clear estimates of the level of influence of negative factors on the productivity of work processes. The most significant result is the introduction of a heuristic implementation with minimal term sets and triangular membership functions of linguistic variables, which allows obtaining a satisfactory result in the conditions of limited initial data. A further direction of work is the development of methods for evaluating the effectiveness of a search and rescue operation with a more flexible consideration of the influence of negative factors, for example, the creation of a fuzzy inference system.

Key words: *fuzzy evaluation, linguistic variable, adverse factor, external influence, search and rescue operation.*