УДК 004.2:[614.878:623.459 **DOI:** 10.31673/2412-9070.2026.054405

Є. В. ГАВРИЛКО[1], д-р техн. наук, професор;
ORSID: 0000-0001-9437-3964
В. В. ШПУРИК[2], канд. техн. наук, доцент;
ORSID: 0000-0002-3477-5731
Л. А. УСТІНОВА[3], д-р мед. наук, професор,
ORCID: 0000-0002-6582-7231
[1]Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
[2]Інститут проблем математичних машин і систем НАНУ, Київ
[3]Українська військово-медична академія, м. Київ

АРХІТЕКТУРА ПЕРСПЕКТИВНОЇ СИСТЕМИ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ МЕДИЧНОГО ЗАХИСТУ ВІД НАСЛІДКІВ ЗАСТОСУВАННЯ ХІМІЧНОЇ ЗБРОЇ

У роботі представлено архітектуру перспективної системи підтримки прийняття рішень медичного захисту від наслідків застосування хімічної зброї.

У межах аналізу останніх досліджень і публікацій систематизовано та вивчено ключові праці, присвячені існуючим системам підтримки прийняття рішень у галузях медичного та хімічного, біологічного, радіаційного, ядерного захисту в Україні та провідних країнах світу. У роботі також розглянуто стандарти НАТО, відповідні прикладні програмні засоби, їхню архітектуру та функціональні можливості, що дозволило сформувати мету роботи. В роботі запропоновано трирівневу архітектуру, де можливості кожного з рівнів суттєво розширено завдяки інтеграційним шлюзам, що забезпечує накопичення та оброблення даних про властивості отруйних речовин різних типів. Розроблена архітектура медичної системи підтримки прийняття рішень містить стандартні та спеціалізовані функціональні елементи. Крім того, у статті наведено схему архітектурних зв'язків системи та описано модуль програмного забезпечення для прогнозування поширення хмари отруйної речовини, який містить сервіс моделювання. Це окремий мікросервіс, створений на мові програмування C++ для складних розрахунків. Запропонована архітектура, схема зв'язків та програмний модуль забезпечать високий рівень підтримки прийняття рішень щодо медичного захисту від наслідків застосування хімічної зброї командирами та начальниками у сучасних умовах.

Верифікація програмного модуля в загальній структурі архітектури дає змогу оцінити переваги запропонованих підходів та підвищення ефективності прийняття рішень. Отримані результати підтверджують доцільність продовження досліджень і завершення розроблення системи підтримки прийняття рішень медичного захисту від наслідків застосування хімічної зброї, яка має потенціал для подальшої інтелектуалізації.

Ключові слова: інформаційні технології, програмне забезпечення, застосунки, система підтримки прийняття рішення, архітектура, отруйні речовини, медичний захист, хімічний, біологічний, радіаційний, ядерний захист.

Вступ

Під час війни російські війська широко застосовують проти Сил оборони України отруйні речовини (ОР).

Дія ОР призводить до ураження та втрат особового складу, тому аспекти медичного й хімічного захисту є важливим напрямом роботи органів військового управління. Одним зі шляхів зниження втрат є удосконалення процесів прогнозування, оповіщення, надання рекомендацій та підтримки прийняття рішень.

© Гаврилко Є. В., Шпурик В. В., Устінова Л. А., 2026

Оптимізацію цих процесів можна забезпечити, зокрема, завдяки впровадженню сучасних і перспективних інформаційних технологій. Таку технологію доцільно локалізувати в межах розроблення медичної системи підтримки прийняття рішень (М-СППР). Завдяки залученню провідних науковців система враховує досвід бойових дій, а також особливості хімічного, біологічного, радіаційного, ядерного (ХБРЯ) та медичного захисту (МЗ).

На основі аналізу експертних оцінок встановлено, що на сьогодні в Україні немає аналогічних СППР, які в перспективі могли б функціонувати як М-СППР. Одним з елементів такої системи може стати медична експертна система з токсикології небезпечних хімічних речовин і головне - ОР. Особливо тих, що найчастіше застосовуються проти Сил оборони України, зокрема хлорпікрину, CN, CS, CR.

Постановка завдання

На основі аналізу бойового досвіду, тенденцій розвитку теорії медичного і ХБРЯ захисту від отруйних речовин та сучасних інформаційних технологій, розробити архітектуру перспективної медичної системи підтримки прийняття рішень від наслідків застосування хімічної зброї. На відміну від існуючих аналогів, запропонована система має інтегрувати практичний досвід ведення бойових дій, стандарти НАТО та передові можливості цифрових платформ.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Для досягнення поставленої мети доцільно детально розглянути сучасні дослідження у галузі цифровізації медичного (МЗ) та ХБРЯ-захисту.

Найбільш цілісним і ґрунтовним є дослідження, представлене в роботі [1]. Ця праця є надзвичайно актуальною, оскільки детально описує системи та програмні засоби ХБРЯ-захисту. Автори аналізують тематичні публікації з метою визначення їхнього потенціалу для підвищення ефективності захисту, а також узагальнюють найкращі практики застосування машинного навчання та штучного інтелекту (ШІ).

В історичній ретроспективі варто згадати працю [2], у якій розглянуто першу масштабну експертну систему з медичного захисту, що стала концептуальною основою для сучасних М-СППР. Вона є інтерактивним програмним забезпеченням (ПЗ), що значною мірою спирається на методи ШІ та використовує правила прийняття рішень, отримані від експертів, для консультування лікарів щодо вибору оптимальної тактики лікування.

У роботі [3] автори здійснюють масштабний аналіз сотень клінічних СППР. З-поміж інших публікацій науковий інтерес викликає праця [4], де представлено огляд наявних систем підтримки прийняття рішень у слабоструктурованих предметних областях із використанням експертної інформації. Наявні програмні застосунки проаналізовано та порівняно між собою з позицій їхнього математичного забезпечення та функціональних можливостей, зокрема у контексті розв'язання задач планування, ведення та забезпечення МЗ й ХБРЯ захисту.

У межах дослідження аспектів інформатизації, окрім аналізу літературних джерел, доцільно розглянути відповідні інформаційні рішення, які можуть слугувати технологічним орієнтиром. У процесі роботи було вивчено доступні для аналізу програмні продукти: експертні системи, СППР та М-СППР, що застосовуються провідними країнами світу для ХБРЯ захисту та МЗ в умовах воєнних дій або надзвичайних ситуацій.

Аналіз сучасних розробок свідчить, що більшість із них належить до двох основних категорій: спеціалізовані медичні/токсикологічні/хімічні довідники (протоколи, стандарти) та складні експертні системи й СППР. Головною метою таких систем є мінімізація часу на пошук критично важливої інформації та забезпечення дотримання стандартизованих протоколів під час надання допомоги постраждалим, насамперед від ХБРЯ ризиків.

Результати аналізу та синтезу даних щодо спеціалізованих довідкових застосунків і баз даних наведено у табл. 1.

Таблиця 1

Особливості спеціалізованих застосунків та баз даних у системах, аналогічних до військових, спеціальних та М-СППР

Назва/Тип системи	Опис та Функціонал	Переваги	Недоліки
TOXNET (США)	Комплексна група баз даних, що містить інформацію про токсикологію, хімічні речовини, навколишнє середовище та здоров'я. Не є СППР у чистому вигляді, а скоріше джерелом знань	Висока надійність даних, наукова обґрунтованість	Складний інтерфейс для швидкої польової роботи
CHEMM (Chemical Hazards Emergency Medical Management)	Розроблено США (HHS/NIH). Надає покрокові рекомендації для невідкладного реагування, включаючи дії на місці події, диференціальну діагностику та лікування для сотень хімічних агентів	Дуже практичний, орієнтований на клініциста. Доступний офлайн, містить інтерактивні алгоритми	Хоча й містить алгоритми, не завжди є справжньою експертною системою, що генерує рішення на основі введених даних
WISER (Wireless Information System for Emergency Responders)	Розроблено NIH/NLM. Призначений для швидкого доступу до інформації про небезпечні речовини в умовах надзвичайної ситуації	Містить фізичні та хімічні властивості, а також інформацію про ризики.	Менш сфокусований на глибокій клінічній токсикології
Клінічні СППР на основі симптомів (DXplain, QMR)	Загальні діагностичні системи, які можуть бути адаптовані для токсикології. Користувач вводить симптоми і система видає список диференційних діагнозів, включаючи отруєння	Можливість інтеграції з існуючими госпітальними системами (MIC). Евристичні правила, метод ваг (scoring system) для оцінки ймовірності діагнозу	Не виявлено
Системи для навчання та симуляції (e-learning)	Використовують віртуальні сценарії уражень для тренування медичного персоналу. Є важливим доповненням до СППР	Віртуальна реальність (VR), штучний інтелект для симуляції динаміки стану пацієнта. Підвищення компетентності персоналу перед використанням СППР у реальних умовах	Не виявлено
Спеціалізовані військові СППР (закриті та доступні розробки різних провідних країн світу)	Розробляються для бойової токсикології (військові отруйні речовини). Фокусуються на: дозуванні антидотів у польових умовах, алгоритмах сортування (triage) та прогнозуванні наслідків	Акцент на ідентифікації речовини та першій допомозі. Застосовує інтуїтивні дерева рішень, Байєсові мережі, принципи Fuzzy Logic (для роботи з неточними симптомами)	Не виявлено

Поряд з аналізом наукових публікацій, у межах цього дослідження принципово важливим є глибоке вивчення прикладних програмних застосунків, СППР, М-СППР та інших інформаційних рішень у сферах МЗ та ХБРЯ.

В Україні під керівництвом професора А. А. Нікітіна розроблено та впроваджено апаратно-програмний комплекс для прогнозування хімічної обстановки «Prognosis», результати практичного застосування якого описано в [5], [6]. Цей комплекс призначений для збору, обліку, аналізу та обробки даних про хімічну обстановку, а також для формування й відображення результатів у текстовому та графічному форматах. Система забезпечує посадових осіб оперативною інформацією, необхідною для своєчасного й обґрунтованого прийняття рішень щодо захисту особового складу військ (сил).

У провідних країнах-партнерах України розроблено низку комплексів, що забезпечують ефективну інформаційну підтримку з питань ХБРЯ. Прикладом є спеціалізовані інформаційні системи на платформах від компаній CBRN-Analysis [7] та Bruhn NewTech [8]. Вони є сертифікованими рішеннями у сфері ХБРЯ-захисту за стандартами США та НАТО, що дозволяють суттєво підвищити рівень ситуаційної обізнаності та пришвидшити прийняття командних рішень завдяки масштабованості та технологічній сумісності. Такі експертні системи містять повний спектр необхідного функціоналу та забезпечують ефективне операційне управління й оцінювання ризиків ХБРЯ-зараження.

Значний інтерес становить також програмний комплекс HPAC (*Hazard Prediction and Assessment Capability*) [9], призначений для прогнозування та моделювання динаміки розповсюдження ХБРЯ-загроз. Він розраховує зони ураження та прогнозовану кількість втрат серед цивільного населення й військовослужбовців. Комплекс дозволяє імітувати вивільнення небезпечних агентів у міському середовищі, прогнозувати їхнє проникнення всередину будівель або оцінювати наслідки викидів безпосередньо в закритих приміщеннях.

Серед доступних інструментів із відкритим кодом варто виділити ALOHA (*Areal Locations of Hazardous Atmospheres*) — програмний застосунок для моделювання розсіювання небезпечних хімічних речовин в атмосфері [10]. Ця програма входить до складу програмного пакета CAMEO® (*Computer-Aided Management of Emergency Operations*) і широко використовується урядовими структурами США, та міжнародними організаціями для планування й реагування на хімічні надзвичайні ситуації.

Питанням безпосередньої клінічної підтримки та діагностики, що максимально відповідають спрямуванню цього дослідження, присвячені офіційні веб-ресурси уряду США, зокрема CHEMM [11] та REMM [12]. Вони забезпечують медичний персонал критично важливою інформацією для діагностування та надання екстреної допомоги при рідкісних або масових отруєннях, коли лікар потребує миттєвих підказок щодо специфіки та протоколів лікування постраждалих. Портал REMM (*Radiation Emergency Medical Management*) є ключовим інформаційним ресурсом у сфері діагностики та лікування радіаційних уражень. Він містить відомості про природу радіації, алгоритми планування дій та принципи ліквідації медичних наслідків радіаційних надзвичайних ситуацій, що має важливе значення для подальшого розширення функціоналу вітчизняних М-СППР у напрямі радіологічного захисту.

Аналіз історичного розвитку цієї предметної області свідчить, що фундаментальна наукова база стосовно отруйних речовин формувалася, зокрема, за результатами досліджень періоду Другої світової війни, а також у радянський період на базі відповідних науково-дослідних центрів. Сучасний етап розвитку потребує переосмислення цієї бази з урахуванням новітніх технологій та актуальних безпекових викликів, що стоять перед Україною.

Наразі відповідні стандарти НАТО щодо МЗ та ХБРЯ-захисту активно впроваджуються та застосовуються в Україні [13], [14].

Упродовж триваючої російсько-української війни результати вітчизняних досліджень у цій сфері знайшли відображення у працях провідних вчених України [15]–[20]. Найбільш глибокий аналіз захисту від новітніх хімічних загроз представлено у роботі [21].

Узагальнюючи досвід України, результати аналізу розробок країн-партнерів, а також функціонал наявних і перспективних програмних засобів, постає можливість точніше конкретизувати наукові завдання дослідження для подальшого викладу основної частини роботи.

Мета і задачі дослідження

Метою і задачами цього дослідження є розробка перспективної архітектури М-СППР, яка інтегрує дані, знання й експертизу, забезпечує прогнозування, оповіщення та оцінку наслідків поширення отруйних і небезпечних хімічних речовин, а також гарантує миттєве адресне інформування особового складу, рекомендує медичні протоколи, завдання деконтамінації, дегазації, застосування антидотів тощо.

Результати дослідження

Архітектура ПЗ має забезпечити високу точність, оперативність обробки великих обсягів різнорідних даних та повну відповідність стандартам медичної безпеки. Система повинна залишатися доступною та захищеною, зважаючи на її специфічне призначення та коло користувачів. Нище наведено основні елементи та ключові принципи формування архітектури розробленої М-СППР.

Архітектура СППР зазвичай базується на трикомпонентній структурі (база даних – ядро СППР – інтерфейс користувача). Проте в сучасних реаліях її суттєво розширено завдяки інтеграційним шлюзам, оскільки в системі передбачено накопичення та оброблення даних про поводження ОР різних типів. Розроблена архітектура М-СППР містить стандартні та спеціалізовані функціональні елементи, представлені на рис. 1.

Для забезпечення високої відмовостійкості та швидкодії в екстремальних умовах обрано мікросервісну архітектуру з пріоритетом на локальну обробку даних (edge computing). Це дозволяє системі функціонувати навіть за умов повної ізоляції від центральних серверів.

Візуалізацію рівнів перспективної архітектури М-СППР наведено на рис. 1.

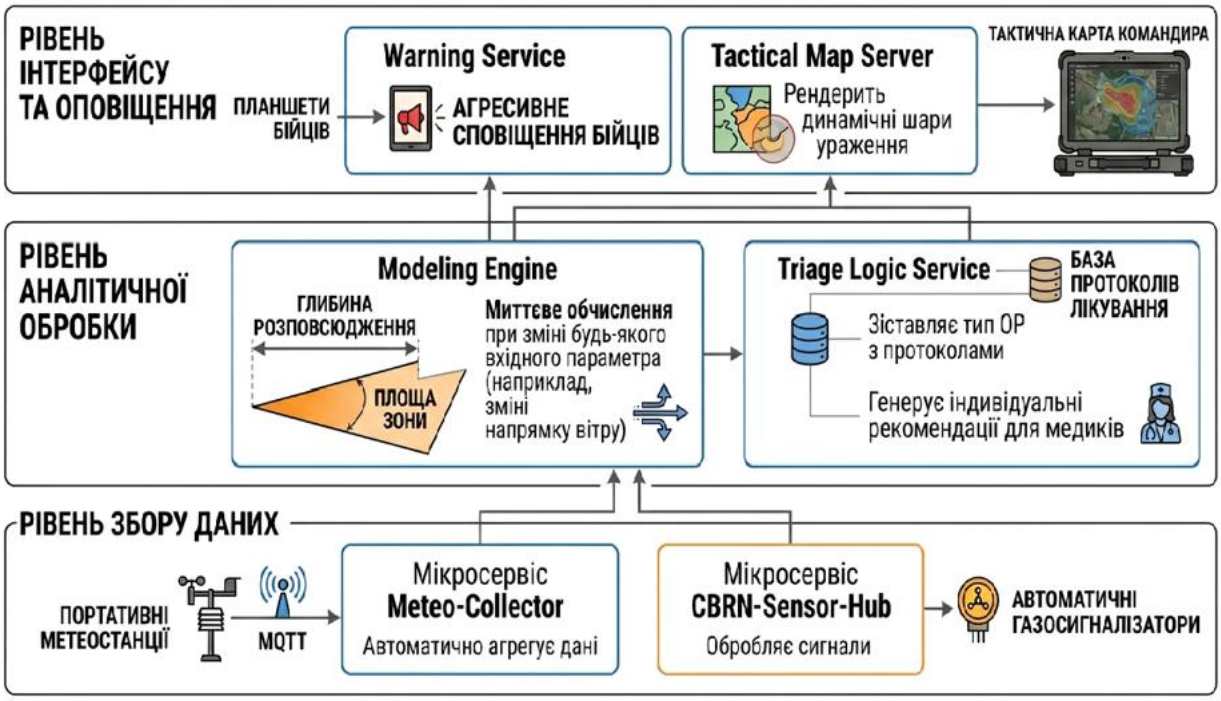


Рис. 1. Рівні перспективної архітектури М-СППР

Безпосередньо зазвичай архітектури СППР складається з таких трьох ключових рівнів:

1. Рівень збору даних (Data Ingestion Layer):

Мікросервіс Meteo-Collector автоматично агрегує дані з портативних метеостанцій через MQTT.

Мікросервіс CBRN-Sensor-Hub обробляє сигнали від автоматичних газосигналізаторів.

2. Рівень аналітичної обробки (Analytical Core):

Modeling Engine реалізує математичний апарат розрахунку глибини розповсюдження та площі зони. Обчислення виконуються миттєво при зміні будь-якого вхідного параметра, наприклад, зміні напрямку вітру.

Triage Logic Service зіставляє тип ОР з базою протоколів лікування та генерує індивідуальні рекомендації для медиків.

3. Рівень інтерфейсу та оповіщення (Delivery Layer):

Warning Service відповідає за «агресивне» сповіщення бійців на планшетах.

Tactical Map Server рендерить динамічні шари ураження на тактичній карті командира.

Виходячи з наведених показників до М-СППР розроблено високорівневу архітектуру.

Високорівнева діаграма компонентів архітектури М-СППР, що об'єднує всі обговорені модулі в єдину екосистему, наведена на рис. 2.

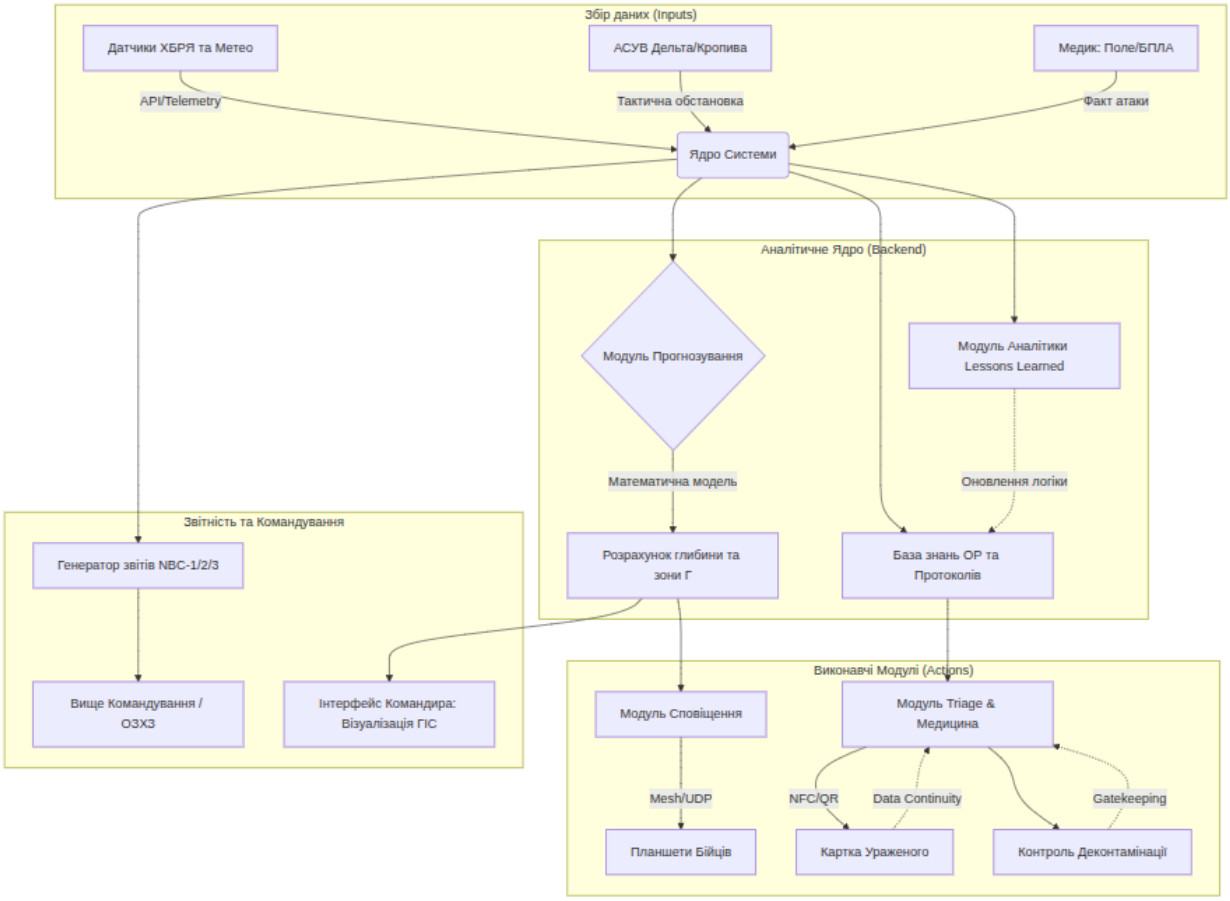


Рис. 2. Схема архітектурних зв'язків системи

Для досягнення поставленої мети розроблено модуль програмного застосунку, що моделює розповсюдження аерозолів CN, CS, CR. Одним із ключових завдань модуля є прогнозування поширення отруйної хмари.

При побудові алгоритму прогнозування в тактичній ланці використано математичні моделі атмосферної дифузії та оперативні метеодані. Для розрахунку використовуються параметри, які умовно поділено на три групи.

Параметри джерела зараження: координати, тип ОР (стійка/нестійка), агрегатний стан (аерозоль), спосіб застосування (скид з БПЛА, підрив ємності, гранати).

Метеорологічні умови: напрямок та швидкість вітру на висоті 2 м, температура повітря та ґрунту, вологість, ступінь вертикальної стійкості повітря (інверсія, ізотермія, конвекція).

Параметри рельєфу: висотність та характеристики забудови (місто, ліс, низина), що впливають на застій ОР.

Розв'язання задачі прогнозування ґрунтується на комбінації Гауссової моделі розсіювання (*Gaussian Plume Model*), яка застосовується для швидкого розрахунку факела розповсюдження у перші хвилини та Лагранжевої моделі частинок для точнішого моделювання в умовах складного рельєфу (за наявності достатніх обчислювальних потужностей).

LogicFlow алгоритму складається з ідентифікації зони викиду, а саме визначення геометрії первинної хмари. Це може бути коло або еліпс у точці удару. Розрахунок вектору поширe-

ння - визначення глибини розповсюдження та ширини зони залежно від швидкості вітру. Визначення зон небезпеки. Передбачено три зони: зона смертельної концентрації (червона), зона вражаючої концентрації (жовта) і зона порогової концентрації/оповіщення (зелена). Кожні 5-15 хвилин при зміні метеоданих відбувається динамічне перерахування зон.

Архітектурна реалізація в ПЗ прогнозування поширення отруйної хмари передбачає сервіс моделювання (Modeling Engine).

Це окремий мікросервіс, створений на мові програмування C++ для складних розрахунків. Гарнізонний/Польовий метеостек, який забезпечує інтеграцію через API з військовими метеостанціями або/та портативними датчиками підрозділів ХБРЯ спостереження, розвідки та іншими наявними та перспективними відповідними пристроями. Зрозуміло в напрямку хімічної частини виду забезпечення. Важливо. Накладання полігонів ураження на карту (передбачено використання MapLibre або Leaflet) з урахуванням ізоліній концентрації забезпечує GIS Layer.

Архітектурна реалізація прогнозування поширення отруйної хмари покладена на сервіс моделювання (*Modeling Engine*). Це окремий високопродуктивний мікросервіс, розроблений мовою C++ для виконання складних обчислень. Інтеграцію через API з військовими метеостанціями та портативними датчиками підрозділів ХБРЯ-спостереження забезпечує гарнізонно-польовий метеостек. Накладання полігонів ураження на карту з урахуванням ізоліній концентрації реалізовано за допомогою *GIS Layer* (із використанням бібліотек *MapLibre* або *Leaflet*).

Додатковою особливістю імплементації алгоритму є врахування положень стандартів що згадані в [13], [14], що дозволяє автоматично генерувати формалізовані звіти (NBC-1, NBC-2) та передавати їх у суміжні системи управління (C2).

Реалізацію моделі обчислення глибини розповсюдження, алгоритму визначення стійкості атмосфери та Гауссової моделі оцінки індивідуальної дози представлено мовою Go у вигляді структурованого пакета hazard.

До ключових аспектів реалізації віднесено:

“Логіка станів”. Використана різниця температур між ґрунтом і повітрям (diff) для автоматичного вибору моделі розсіювання.

Врахування особливостей місцевості. Для цього введено TerrainCoeff, що дозволяє миттєво коригувати розрахунок для міста або лісу.

“Гауссова модель”. Реалізовано розрахунок концентрації у точці (x,y), що дозволяє системі визначати ступінь отруєння конкретного бійця на основі його координат.

Функція CalculateArea динамічно змінює фігуру (коло/сектор) залежно від швидкості вітру. Фрагмент програмного коду модулю ПЗ наведено нижче.

```
package main

import (
    "fmt"
    "math"
)

// Константи станів атмосфери
const (
    Inversion  = "Inversion"  // Інверсія (найбільша небезпека)
    Isothermy  = "Isothermy"  // Ізотермія
    Convection = "Convection" // Конвекція (швидке розсіювання)
)

// Характеристики місцевості
const (
    TerrainOpen   = 1.0
```

```
    TerrainForest = 0.15
    TerrainUrban  = 0.3
)

// HazardModel структура для розрахунків
type HazardModel struct {
    BaseG       float64 // Базовий показник глибини для конкретної ОР
    WindSpeed   float64 // Швидкість вітру (м/с)
    TempAir     float64 // Температура повітря (С)
    TempGround  float64 // Температура ґрунту (С)
    TerrainCoeff float64 // Коефіцієнт місцевості
}

// DetermineStability автоматично визначає стан атмосфери за градієнтом температур
func (m *HazardModel) DetermineStability() (string, float64) {
    diff := m.TempGround - m.TempAir

    switch {
    case diff < -1.0:
        return Inversion, 1.5 // Максимальний коефіцієнт стійкості
    case diff > 1.0:
        return Convection, 0.5 // Мінімальний коефіцієнт стійкості
    default:
        return Isothermy, 1.0
    }
}

// CalculateDepth обчислює глибину розповсюдження (Г)
func (m *HazardModel) CalculateDepth() float64 {
    _, kSt := m.DetermineStability()
    // Формула: Г = G * v^n * kSt * kTerrain
    // Приймаємо n = 0.7 як середнє значення для тактичних розрахунків
    n := 0.7
    depth := m.BaseG * math.Pow(m.WindSpeed, n) * kSt * m.TerrainCoeff
    return depth
}

// CalculateArea обчислює площу зони зараження (S)
func (m *HazardModel) CalculateArea(depth float64) float64 {
    var phi float64 // Кут розширення в радіанах

    switch {
    case m.WindSpeed < 0.5:
        phi = 2 * math.Pi // 360 градусів (коло)
    case m.WindSpeed >= 0.5 && m.WindSpeed <= 1.0:
        phi = math.Pi // 180 градусів (півколо)
    default:
        phi = math.Pi / 4 // 45 градусів (сектор)
    }

    return 0.5 * math.Pow(depth, 2) * phi
}
```

```
// CalculateGaussianDose розраховує приблизну дозу (D) у конкретній точці (спрощена модель)
func (m *HazardModel) CalculateGaussianDose(distanceX, distanceY, timeSec, releaseAmount float64) float64 {
    // Спрощені коефіцієнти дифузії (sigma)
    sigmaY := 0.1 * distanceX
    sigmaZ := 0.05 * distanceX

    if distanceX <= 0 {
        return 0
    }

    // Гауссова формула концентрації C
    exponent := math.Exp(-(math.Pow(distanceY, 2) / (2 * math.Pow(sigmaY, 2))))
    concentration := (releaseAmount / (2 * math.Pi * m.WindSpeed * sigmaY * sigmaZ)) * exponent

    // Доза = Концентрація * Час експозиції
    return concentration * timeSec
}

func main() {
    // Приклад: Зарин (GB), швидкість вітру 3 м/с, лісиста місцевість
    model := HazardModel{
        BaseG:       5.0,
        WindSpeed:   3.0,
        TempAir:     15.0,
        TempGround:  12.0, // Інверсія (ґрунт холодніший за повітря ввечері)
        TerrainCoeff: TerrainForest,
    }

    stability, _ := model.DetermineStability()
    depth := model.CalculateDepth()
    area := model.CalculateArea(depth)
    dose := model.CalculateGaussianDose(500, 10, 60, 1000) // 500м від епіцентру, 10м вбік

    fmt.Printf("--- Результати моделювання ---\n")
    fmt.Printf("Стан атмосфери: %s\n", stability)
    fmt.Printf("Глибина розповсюдження: %.2f км\n", depth)
    fmt.Printf("Площа зони ураження: %.2f кв.км\n", area)
    fmt.Printf("Прогнозована доза (60с): %.4f мг*хв/л\n", dose)
}
```

Моделювання сценарію хімічної атаки та робота М-СППР в рамках архітектури

У ході досліджень змодельована ситуація для обрахунку розповсюдження ОР, на прикладі відомого ОР Зарін. Моделювання дозволяє порівняти з відомими ПЗ та ручними методами. Розвиток і модулі ПЗ дозволять в подальшому розрахунок й інших видів і типів ОР.

Для перевірки працездатності М-СППР було змодельована сценарій застосування противником ОР Зарін по позиціях батальйону.

Вхідні дані: швидкість вітру - 3 м/с, стан атмосфери — інверсія (K_{st}=1.5 коефіцієнт вертикальної стійкості атмосфери), місцевість - пересічна з ділянками лісу (K_{ter}=0.5 коефіцієнт шорсткості та поглинальної здатності місцевості).

Результат: Система за 0.8 секунди розрахувала глибину розповсюдження (Г= 1.2 км глибина розповсюдження хмари отруйної речовини, яка визначається як максимальна відстань від джерела, на якій зберігається уражаюча концентрація) та згенерувала сектор ураження на ГІС-карті.

Автоматичне сповіщення отримали 98% підключених пристроїв у зоні ризику протягом перших 15 секунд після фіксації датчиком.

Порівняльний аналіз швидкості прийняття рішень.

Одним із ключових результатів дослідження є скорочення часових показників на критичних етапах (табл. 2).

Таблиця 2

Порівняння часових показників реагування на застосування ОР

Етап реагування	Традиційні методи (хв)	З використанням М-СППР (хв)	Ефективність
Розрахунок зони зараження	10–15	< 0.02	> 500
Оповіщення підрозділів	5–7	0.2–0.5	20
Початок антидотної терапії	15–20	5–8	2.5

При цьому за критеріальні показники прийняті доступні ручні показники роботи начальника служби РХБз з досвідом.

Зрозуміло, що автоматизація має значні переваги але порівняно на нашу думку на зараз коректні.

Попри високу швидкість, система залишається залежною від щільності мережі ХБРЯ розвідки чи спостереження.

При їх відсутності точність прогнозу базується на суб'єктивних повідомленнях спостерігачів, що вносить похибку до 15-20% у визначення епіцентру застосування ОР.

Також виявлено, що в умовах надвисокої активності РЕБ (повне придушення частот) ефективність Mesh-мереж значно падає, що вимагає впровадження альтернативних способів передачі даних у систему.

У рамках експерименту встановлені наступні проблемні питаннями щодо розробки архітектури М-СППР:

1. Складність, що обумовлена необхідністю функціонування системи в умовах війни, що обумовлено: неможливістю використання мобільних застосунків, виходячи з безпекових міркувань і застосування засобів радіорозвідки та радіоелектронної боротьби безпосередньо в районах застосування ОР.

2. Складність збору реальної метеорологічної обстановки в районі застосування ОР.

3. Складність та швидкість діагностики ураження в бойових умовах, що обумовлено багатофакторністю симптомів отруєнь та їх неспецифічність, що може імітувати інші захворювання.

4. Критичний час на прийняття рішення. При ураженнях бойовими ОР або НХР час до надання адекватної допомоги є критично малим. Неправильна або запізніла діагностика веде до підвищення рівня смертності та інвалідності.

5. Необхідність стандартизації та дотримання протоколів. Різноманіття токсикантів: існує величезна кількість потенційних ОР, кожна з яких вимагає унікального алгоритму дій в бойових умовах.

6. Обмежений досвід медичного персоналу, що може не мати щоденного досвіду роботи з такими пацієнтами. М-СППР має забезпечити доступ до актуальних, міжнародно визнаних, національних протоколів лікування.

7. Умови надання допомоги, що зумовлені стресом та небезпекою. Допомога часто надається в умовах бойових дій і в умовах надзвичайної ситуації, як то застосування ОР, стресу або безпосередньої небезпеки (зона зараження). СППР повинна мати інтуїтивно зрозумілий інтерфейс і мінімізувати когнітивне навантаження та відео-підказки.

8. Обмежені ресурси в ході надання допомоги на етапі первинної допомоги на полі бою, в стабілізаційних установах, шпиталях (обладнання, антидоти, лабораторна діагностика) можуть бути обмежені. СППР має пропонувати оптимальні рішення з огляду на наявні можливості.

Оскільки система має поєднати експертні середовища органів військово управління, наукових і медичних установ постає питання розподілу повноважень щодо внесення даних та її адаптації для застосування в базах даних, розмітки та адаптації.

Разом з недоліками передбачаються і значні переваги.

Поєднання всіх елементів в М-СППР дає змогу уникнути ряду труднощів, що були описані вище щодо роботи системи і підвищити продуктивність системи за рахунок:

1. Особливої інтеграції баз і баз знань даних з іншими зовнішніми та внутрішніми базами даних;

2. Скорочення тривалості очікування відповіді на запит користувача;

3. Ефективного використання великих математичних методів і методик;

4. Використання донних ГІС та метео;

5. Забезпечення діалогу з базою моделей, базою даних і базою знань;

6. Зниження витрат на створення та експлуатацію системи;

7. Мінімізації складності і вартості підтримки та збільшення ефективності чи інших показників у користувачів;

8. Зменшення інфраструктурних перешкод, які затримують розгортання нових модулів і технологій.

Це пов’язано з тим, що частина підсистем можуть бути пов’язані з Інтернет-мережею, а частина бути автономною і захищеною.

Система міститиме програмні й математичні модулі для оцінки даних хімічної, метеорологічної медичної розвідки та спостереження.

Це дозволить прогнозувати поширення зараження повітря і місцевості ОР. Також вперше буде розроблено модуль прогнозування наслідків застосування бойових токсинів. Реалізація цього проєкту можлива через створення корпоративного комп'ютерного застосунку М-СППР.

Після накопичення достатньої кількості даних та знань, система зможе аналізувати інформацію та надавати рекомендації на основі нейронечітких моделей інтелектуальних СППР.

Висновки та перспективи подальших досліджень

Запропонована у роботі трирівнева мікросервісна архітектура М-СППР із застосуванням периферійних обчислень та сучасного програмного стеку (Go, C++) забезпечує високу відмовостійкість. Завдяки цьому система здатна функціонувати в автономному режимі навіть у разі повної ізоляції від центральних серверів.

Експериментальна перевірка та порівняльний аналіз довели високу математичну та операційну ефективність М-СППР. Застосування системи дозволяє скоротити час розрахунку зони хімічного зараження з 10–15 хвилин до підсекундного рівня (< 0.02 хв), а також у 20 разів пришвидшити процес оповіщення підрозділів у зоні ризику.

Наукова новизна та практична цінність модуля прогнозування полягають у вдалому поєднанні Гауссової моделі розсіювання (для експрес-розрахунків) та Лагранжевої моделі частинок (для врахування рельєфу й забудови). Це функціонує в синергії з автоматичною генерацією формалізованих звітів за стандартом НАТО АТР-45 (NBC-1, NBC-2), що забезпечує повну сумісність із системами управління країн-партнерів.

Встановлено, що головними деструктивними факторами для функціонування системи, що розробляється, є те, що у бойових умовах є ризики радіорозвідки, дефіцит метеоданих та зниження ефективності зв'язку під впливом засобів РЕБ супротивника. Ведеться робота по зниження впливу факторів.

Перспективними напрямами подальших досліджень полягають в наступному, це інтеграції нейронечітких моделей для роботи з неточними даними розвідки, спостереження чи доповідей та впровадження альтернативних захищених каналів передачі інформації. Також можлива інтеграція з цифровими платформами, розробка і наповнення великого експертного середовище і його інтеграція в одну систему.

Внесок авторів

Євген ГАВРИЛКО – аналіз джерел, підготовка огляду літератури або теоретичних основ дослідження вимоги до М-СППР, теорія ХБРЯ захисту від отруйних речовин; Вадим ШПУРИК – архітектура М-СППР, програмного забезпечення; Людмила УСТІНОВА – теорія медичного захисту, підготовка огляду літератури або теоретичних основ дослідження.

Декларація про штучний інтелект

У роботі використано можливості штучного інтелекту для перевірки грамотності у вступі та додаткової перевірки тексту анотації, що приведена у роботі англійською мовою.

Конфлікт інтересів

У роботі відсутній конфлікт інтересів. Під час підготовки роботи не існувало жодних комерційних, фінансових чи інших взаємовідносин, які могли б бути розцінені як такі, що здатні вплинути на результати дослідження або їх інтерпретацію. Робота виконана відповідно до принципів академічної доброчесності, етичних норм проведення наукових досліджень та вимог редакційної політики щодо запобігання конфлікту інтересів.

Список використаної літератури

1. Tamás Kegyes, Zoltán Süle, János Abonyi (2025) Machine learning -based decision support framework for CBRN protection. Heliyon, Volume 10, Issue 4, e25946. 1-19. DOI:10.1016/j.heliyon.2024.e25946,https://www.cell.com/action/showPdf?pii=S2405-8440%2824%2901977-7

2. Shortliffe, Edward. (1976). MYCIN: A Rule-Based Computer Program For Advising Physicians Regarding Antimicrobial Therapy Selection. 739-739. 10.1145/1408800.1408906

3. Kawamoto, K., Houlihan, C. A., Balas, E. A., & Lobach, D. F. (2005). Improving clinical practice using clinical decision support systems: A systematic review of trials to identify features critical to success. BMJ, 330(7494), 765–768.

4. Kadenko, Sergii & Tsyganok, Vitaliy & Andriichuk, Oleh & Karabchuk, A.. (2020). Аналіз інструментарію підтримки прийняття рішень у контексті вирішення задач стратегічного планування. Реєстрація, зберігання і обробка даних. 22. 77-91. 10.35681/1560-9189.2020.22.2.211281

5. Нікітін А.А., Блекот О.М., Романюк В.П. та Бевзюк А.П.(2022). Метод оцінки ймовірного ризику втрати здоров'я людини в умовах забруднення небезпечними хімічними речовинами. Український військово-медичний журнал, 3 (4), 121-127. https://doi.org/10.46847/ujmm.2022.4(3)-121

6. Бевзюк, А., та Нікітін, А. (2023). Апаратно-програмний комплекс для прогнозування хімічної обстановки. Соціальний розвиток і безпека , 13 (5), 200-209. https://doi.org/10.33445/sds.2023.13.5.19

7. CBRN-Analysis. Програмний застосунок. URL: https://bruhn newtech.com/cbrn-analysis/ [Дата звернення 5 січня 2026].

8. BRUHN tnvironics. Програмний застосунок. https://www.mysticrepc.org/home/news/wiser-hazardous-material-platform-be-discontinued. [Дата звернення 5 січня 2026].

9. HPAC: Hazard Prediction And Assessment Capability. Програмний застосунок. URL-https://www.parsons.com/2023/08/hpac-hazard-prediction-and-assessment-capability/[Дата звернення 5 березня 2026].

10. ALOHA® (Areal Locations of Hazardous Atmospheres). Програмний застосунок URL-https:https://www.epa.gov/cameo/aloha-software [Дата звернення 5 січня 2026].

11. The U.S. Department of Health & Human Services. CHEMM. Chemical. Hazards emergency medical management. URL-https://www.hhs.gov [Дата звернення 5 січня 2026].

12. The U.S. Department of Health & Human Services. REMM. Radiation emergency medical management. URL-https://remm.hhs.gov/ [Дата звернення 5 січня 2026].

13. NATO Standart, CBRN Defence Standards ATP-3.8.1 https://www.scribd.com/document/865400515/ATP-3-8-1-VOLIII-EDA-V1-E, [Дата звернення 5 березня 2026].

14. NATO Standart 005 Atp 45 F v2 Warning and Reporting and Hazard Prediction of Chemical, Biological, Radiological and Nuclear Incidents (Operators Manual) URL-https://www.scribd.com/document/794442258/005-Atp-45-f-v2-Warning-and-Reporting-and-Hazard-Prediction-of-Chemical-Biological-Radiological-and-Nuclear-Incidents-Operators-Manual?_gl=1%2A1aiu6i3%2A_gcl_au%2AMTA3MjQzNjI1Ny4xNzc1ODEyOTU0&language_settings_changed=English , [Дата звернення 5 березня 2026].

15. L. A. Ustinova, V. L. Bohaienko, Ye. V. Havrylko, N. V. Kurdil, V. I. Saglo, V. A. Barkevych, V. M. Shmigol, O. A. Yevtodiev (2022). Актуальні питання спеціальної обробки в медичних підрозділах військових частин і закладах охорони здоров'я Збройних Сил України в умовах хімічного, біологічного, радіоактивного зараження. Ukrainian Journal of Military Medicine, 3, 3, pp. 83-91, DOI: 10.46847/ujmm.2022.3(3)-083, https://ujmm.org.ua/index.php/journal/article/view/292, ISSN: 2708-6623, 2708-6615

16. Natalia V. Kurdil, Olga O. Khudaikulova, Borys I. Palamar, Oleksandr V. Yushchenko, Lyudmila A. Ustinova, Artur O. Zulfigarov, Yevhen V. Gavrylko (2022) Results of research of personal hygiene products for suitability for special processing in zones of chemical, radioactive contamination and in combat conditions / Wiadomości Lekarskie, VOLUME LXXV, ISSUE 11 PART 1, NOVEMBER 2022. Pp. 2604-2608. https://doi.org/10.36740/WLek202211109

17. Savytskyi V.L. Ustinova L.A. Bohaienko V.L. Havrylko E.V. Saglo V.I. Shmygol V.M. Yevtodiev O.A. (2024). Problems of force health protection at the conditions of chemical ammunition use during russian aggression on ukrainian territory. Solving ways. Ukrains'kij Zurnal Vijskovoi Medicini. ISSN: 2708-6615. Volume 5, Issue 4, Pages 84-93. DOI: 10.46847/ujmm.2024.4(5)-084

18. O.L. Turovsky, E.V. Havrylko, O.M. Pankratov, L.A. Ustinova, B.D. Khalmuradov, V.L. Bohaienko (2023). Assessment of the consequences of the use of tactical nuclear weapons on the population and infrastructure in the regISSN 2313-4607 (Online), ISSN 2304-8336 (Print)ions of a nuclear explosion. Nuclear Physics and Atomic Energy, 24, 3, pp. 267-282, 10.15407/jnpae2023.03.267, http://jnpae.kinr.kiev.ua/24.3/html/24.3.267.html, ISSN: 1818-331X, 2074-0565

19. L.A. Ustinova, V.L. Bohaienko, M.I. Khizhniak, O.M. Vlasenko, O.A. Komponiets, V.I Saglo, V.A. Barkevych, V.M. Shmigol, O.A. Yevtodiev (2022) Current threats to the use of combat toxic nervous and paralytic action on the territory of Ukraine and features of medical protection. Ukrainian Journal of Military Medicine, №2 (3). C.81-91, https://doi.org/10.46847/ujmm.2022.2(3)-081

20. Shvaiko, V., Bandurka, O., Shpuryk, V., & Havrylko, Y. V. (2021). Methods For Detecting Fires In Ecosystems Using Low-Resolution Space Images. Informatyka, Automatyka, Pomiary W Gospodarce I Ochronie Środowiska, 11(1), 15–19. https://doi.org/10.35784/iapgos.2576

21. Устінова, Л. А., & Богаєнко, В. Л. (2026). Мінімізація наслідків хімічного ураження особового складу та особливості медичного захисту при наданні тактичної догоспітальної допомоги за досвідом російсько-української війни з врахуванням стандартів НАТО. Український журнал військової медицини, 7(1), 48-62. https://doi.org/10.46847/ujmm.2026.1(7)-048

Ye. Havrylko, V. Shpuryk, L. Ustinova

ARCHITECTURE OF A PERSPECTIVE CLINICAL DECISION SUPPORT SYSTEM FOR MEDICAL PROTECTION AGAINST THE CONSEQUENCES OF CHEMICAL WEAPONS EMPLOYMENT

This paper presents the architecture of an advanced decision support system for medical protection against the consequences of chemical weapons employment.

As part of the literature review, key studies dedicated to existing decision support systems within the domains of medical and chemical, biological, radiological, and nuclear defense in Ukraine and across advanced nations have been systematized and analyzed. Furthermore, the paper examines NATO standards, relevant applied software tools, their architecture, and functional capabilities, which enabled the formulation of the study's primary objective.

The paper proposes a three-tier architecture wherein the capabilities of each layer are significantly enhanced through integration gateways, ensuring the accumulation and processing of data regarding the properties of various types of toxic substances. The developed architecture of the medical decision support system incorporates both standard and specialized functional elements. Additionally, the article provides a diagram of the system's architectural relationships and describes a software module for forecasting toxic cloud dispersion, which includes a dedicated modeling engine. This is a separate microservice created in the C++ programming language for complex calculations. The proposed architecture, relationship diagram, and software module will deliver a high level of decision support for commanders and officers regarding medical protection against the consequences of chemical weapons employment under contemporary conditions.

Verification of the software module within the overall architectural framework allows for an assessment of the advantages of the proposed approaches and the subsequent increase in decision-making efficiency. The results obtained confirm the viability of continuing research and finalizing the development of the decision support system for medical protection against the consequences of chemical weapons employment, which possesses substantial potential for further intellectualization.

Keywords: information technology, software, applications, decision support system, architecture, toxic substances, medical protection, chemical, biological, radiation, nuclear protection.

Надійшла до редакції: 05.08.2026
Прийнята до друку: 26.08.2026
Опубліковано: 30.10.2026
© 2026 Гаврилко Є. В., Шпурик В. В., Устінова Л. А.
Цей матеріал ліцензовано за умовами CC BY 4.0.https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/