

УДК623:(681.5+542.2)

DOI: 10.63978/3083-6476.2025.3.3.07

Бабарик Артем Анатолійович

кандидат хімічних наук
офіцер відділу дослідження хімічного,
біологічного, радіаційного захисту
Військова частина А4983
Київ, Україна
e-mail: artem.babaryk@gmail.com
ORCID: 0000-0003-3886-3613

Хлонь Сергій Євгенович

кандидат історичних наук
заступник командира
Військова частина А4983
Київ, Україна
e-mail: S.Khlon3012@gmail.com

СПЕКТРАЛЬНИЙ АНАЛІЗ ЯК ВЕКТОР РОЗВИТКУ ЗАСОБІВ ХІМІЧНОЇ РОЗВІДКИ

***Анотація.** Розглянуто та проаналізовано інноваційні засоби дистанційної спектральної хімічної розвідки на прикладі зразків озброєння блоку НАТО та російської федерації. Розкрито особливості спектральних методів визначення бойових отруйних речовин, які є основним принципом роботи групи приладів.*

Сформульовано проблему та обґрунтовано необхідність розвитку напрямку дистанційних спектральних засобів хімічної, біологічної, радіаційної розвідки для виконання завдань і заходів системи хімічного, біологічного, радіаційного, ядерного захисту Збройних Сил України в контексті змін характеру сучасного російсько-українського збройного протистояння.

***Ключові слова:** ХБРЯ загрози, спектральні прилади дистанційної ХБР розвідки, БОР, спектральний аналіз.*

Artem Babaryk

Candidate of Sciences
officer of CBRN research department
of Research Centre of Support Forces of the
Armed Forces of Ukraine
Military Unit F4983
Kyiv, Ukraine
e-mail: artem.babaryk@gmail.com
ORCID: 0000-0003-3886-3613

Sergiy Khlon

Candidate of Sciences

Deputy Commander

Military Unit F4983

Kyiv, Ukraine

e-mail: S.Khlon3012@gmail.com

SPECTRAL ANALYSIS AS A VECTOR FOR THE DEVELOPMENT OF CHEMICAL RECONNAISSANCE DEVICES

Abstract. Due to the acute toxicity and extreme lethality, yet the non-selective type of activity of CWA's (chemical weapon agents) toward military targets and the civilian population, timely detection and identification of CWA's is becoming an important element of modern war conflicts. Spectral analysis is employed in nowadays for the engineering of accurate and selective detection of chemical warfare weapons. An analysis of current trends in the development of remote sensing of CWA's shows the NATO member states and the Russian Federation have already mastered and are continuing enhancement and modernization of the latest technologies for the development of weapons based on the laser radiation differential absorption spectroscopy (differential absorption LIDARS), Fourier-transformed infrared (FT-IR) spectroscopy for the detection, identification, determination of concentration ranges for revealed CWA contaminated areas, linking them to corresponding geospatial data. The mentioned type of devices is capable of discrimination of main groups of CWA's like nerve gases, blister substances, explosives as well as industrial toxic compounds at a range of as far as 6 km. The rich possibilities for detection of various industrial toxic substances using long-range stand-off chemical reconnaissance would contribute to increasing the situational awareness of the Armed Forces of Ukraine units that perform combat (special) missions in the territories, where the main chemical industry objects of Ukraine are located. The effective counteraction to recent potential chemical threats depends on the accelerated research and development of the grounds of advanced analytical methods for detecting CWA's, as well as the settling and development of cooperation with international professional partner organizations would significantly advance the capabilities of the design, scale up the production, move forward the enhancement and modernization of up-to-date chemical reconnaissance equipment.

Keywords: CBRN threats; long-range standoff CBR reconnaissance devices; chemical weapon agents; spectral analysis.

Вступ

Наслідком технологічного поступу XX ст. стала друга індустріальна революція, яка докорінним чином вплинула на розвиток військової справи. Від моменту першого застосування хімічної зброї понад 100 років тому сучасний період налічує ряд випадків масштабного застосування бойових отруйних речовин (далі – БОР). Ірак повідомив про використання хімічної зброї, що містить нервово-паралітичні речовини та іприт, під час війни в Ірані в 1980-х роках [5]. Ймовірно, застосування БОР відбулося в Сирії, де хімічна зброя була застосована проти незахищеного цивільного населення. Останнім з них була хімічна атака в місті Дума, Сирія, у квітні 2018 року, в результаті якої загинуло 43 особи [1]. У нападі були використані різні хлоровані органічні хімічні речовини, такі як дихлорфенол, дихлороцтова кислота, борнілхлорид, трихлороцтова кислота, хлоралгідрат, хлорфенол тощо [2]. Про застосування бойових отруйних речовин типу “Новачок” повідомлялося у березні 2018 року в Солсбері, Велика Британія, де співробітниками російських спецслужб було отруєно колишнього російського шпигуна Сергія Скрипаля та його доньку [3]. Отже, досягнення політичних цілей шляхом невибіркового застосування БОР по військовим цілям, залякування та терор цивільного населення, усунення та знищення політичних опонентів, санкціонованого урядами тоталітарних держав, продовжується всупереч звичаїв ведення війни та домовленостей, які виникли з розв’язанням найбільших глобальних воєнних конфліктів – Першої та Другої Світової воєн.

Постановка проблеми. Згідно з Організацією із заборони хімічної зброї (ОЗХЗ), хімічна зброя визначається як зброя, що містить будь-яку токсичну хімічну речовину або її

прекурсор, що може спричинити смерть, травми, тимчасову недієздатність або подразнення органів чутливості внаслідок своєї хімічної дії. Для застосування хімічної зброї на глибину оперативної побудови угруповання військ (сил) використовуються такі системи доставки, як авіаційні засоби (підвісні баки, авіабомби), артилерійські засоби (снаряди, міни, ракети), безпілотні літальні апарати (БПЛА) тощо. Характеристикою хімічних атак є висока летальність та довгострокові наслідки для цивільного населення, що зазнало впливу, а також навколишнього середовища (рослинності та тварин). Тому оперативне виявлення та ідентифікація БОР є одним з пріоритетних завдань ХБРЯ захисту.

З метою вирішення комплексу проблем, пов'язаних із забезпеченням захисту від хімічної зброї, в країнах НАТО продовжуються інтенсивні дослідження з розробки нових методів і технологій виявлення та ідентифікації отруйних речовин (ОР), а також модернізації технічних засобів хімічної розвідки, що знаходяться на озброєнні. На цей час розроблено низку нових засобів хімічної розвідки, які характеризуються покращеними можливостями та технічними параметрами. Зокрема, пріоритет щодо створення засобів ідентифікації БОР у ХХІ ст. приділяється розробці малогабаритних приладів для індивідуального користування, принцип дії котрих заснований на різних аналітичних методах, таких як поверхнева акустична хвиля (surface acoustic wave, SAW), сенсорні технології, спектрометрія іонної рухливості та інфрачервона (ІЧ) спектроскопія, а також комбінаціях цих методів, що сприяє значному підвищенню їх ефективності, експресності та селективності.

У сучасних засобах індикації найчастіше використовується метод спектрометрії іонної рухливості, що забезпечує високу швидкодію, чутливість та портативність приладів цього типу. Обмеженням щодо використання та недоліком є обов'язкова присутність таких приладів у зоні зараження, що передбачає наявність оператора пристрою безпосередньо в точці та момент часу, де проводиться виявлення та ідентифікація. Це є проблемним питанням у контексті сучасної російсько-української війни, що характеризується безпрецедентною концентрацією засобів та глибини ураження. В обстановці, що складається на полі бою, живучість особового складу і зменшення втрат є одним з пріоритетних завдань.

Потенційним вирішенням цього питання є застосування засобів дистанційного виявлення отруйних речовин, які варто розглядати як складову частину перспективної системи ХБР розвідки, що дозволяє підвищити ефективність заходів щодо виявлення радіаційної, хімічної та біологічної обстановки на великих площах у задані терміни. Важливо зазначити, що технологічним втіленням таких засобів володіють як країни-учасниці блоку НАТО, так і війська РХБ захисту російської федерації, що гостро ставить питання нарощування спроможностей ХБР розвідки підрозділів ЗС України з метою адекватної відповіді на виникнення ризиків ХБРЯ загроз всіх рівнів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Наукові публікації з питання, що вивчається в даній роботі, практично відсутні у вітчизняних джерелах, що є додатковим аргументом необхідності й вчасності його розгляду.

Jindal та інші в оглядовій роботі [4] відводять центральне місце диференційному поглинаючому лідару серед групи пристроїв, принцип роботи яких заснований на методах спектроскопії іонної рухливості, інфрачервоної спектроскопії (з перетворенням Фур'є), спектроскопії комбінаційного розсіювання, тощо, що може забезпечити вимірювання концентрації речовин різної хімічної природи у повітрі з чутливістю до $1:10^{-6}$. Flanagan [7] описує розвиток практичної реалізації стаціонарного приладу дистанційної хімічної розвідки з 50-х р. ХХ ст. в Міністерстві оборони США. Сучасний погляд та методологію виявлення БОР за допомогою оптичної спектроскопії під впливом стохастичних сторонніх сигналів викладено в [8]. Цикл робіт [5–7; 9; 12] присвячено особливостям визначення класів або індивідуальних токсичних промислових матеріалів з використанням лідарів, де активним середовищем є CO_2 (карбон діоксид).

Враховуючи виникаючі загрози ураження новими БОР типу “Новічок” [3], середня порогова токсодоза яких складає менше за $1 \cdot 10^{-4}$ мг хв л⁻¹, оперативне та точне виявлення таких БОР є актуальним науковим завданням.

Метою статті є аналіз і обґрунтування ролі і місця наземного спектрального засобу дистанційної хімічної розвідки в системі ХБРЯ захисту ЗС України під час ведення операцій.

Виклад основного матеріалу

Лідар диференційного поглинання (Differential Absorption LIDAR, DIALS) – це один із методів застосування лідару, що широко використовується для дистанційного виявлення бойових отруйних речовин, забруднюючих речовин та токсичних промислових речовин в атмосфері [4–7].

Це метод, заснований на пружному розсіюванні та поглинанні випромінювання, яке генероване високоенергетичною імпульсною лазерною системою з можливістю налаштування, причому зміни властивостей сигналу визначають тип речовини, присутній у досліджуваній області, та її концентрацію. Лазерна система надсилає два сигнали з близькими довжинами хвиль випромінювання. Випромінювання одного з сигналів поглинається визначуваною речовиною, тоді як випромінювання іншого не поглинається або поглинається набагато слабше.

У результаті, інтенсивність зворотного розсіяного сигналу на одній з довжин хвиль буде меншою порівняно з інтенсивністю зворотного сигналу на іншій. Співвідношення інтенсивностей обох сигналів разом з іншими параметрами використовується для розрахунку концентрації досліджуваного агента. Час проходження зворотного сигналу відносно початково часу генерації лазерного імпульсу в атмосферу використовується для визначення відстані до агента. Сигнал у різних інтервалах дальності використовується для розрахунку концентрації на різних відстанях з метою оцінки профілю концентрації з роздільною здатністю за дальністю. Основою установки є налаштовуваний імпульсний лазер як випромінююче джерело передавача лідару, який надсилає лазерні імпульси в область дослідження атмосфери з фіксованою частотою повторення імпульсів. Лазер можна налаштувати на вимірюючу та контрольну довжину хвиль по чергово. Лазерний промінь розширюється за допомогою розширювача променя для зменшення його розходження та охоплення досліджуваної області повітря. Розсіяне від хмари отруйної речовини випромінювання збирається в полі зору приймаючого телескопа, який спрямовує прийняте випромінювання на оптичний детектор. Вибір оптичного детектора залежить від діапазону довжин хвиль передавача, вікна детектора, коефіцієнта посилення, темнового струму тощо.

Електричний сигнал від детектора посилюється за допомогою попереднього підсилювача та перетворюється на цифровий сигнал за допомогою системи збору даних. Оцифрований сигнал обробляється для оцінки відстані та концентрації бойової отруйної речовини. Ця інформація, нарешті, відображається на дисплеї. Цей метод є високочутливим та селективним. Оскільки хімічні речовини поглинають довжини хвиль вибірково, то налаштовуючись на відповідні характеристичні частини спектру розсіяного випромінювання, можна легко якісно розрізнити речовини. На рис. 1 показано типові спектри поглинання потенційних бойових хімічних речовин.

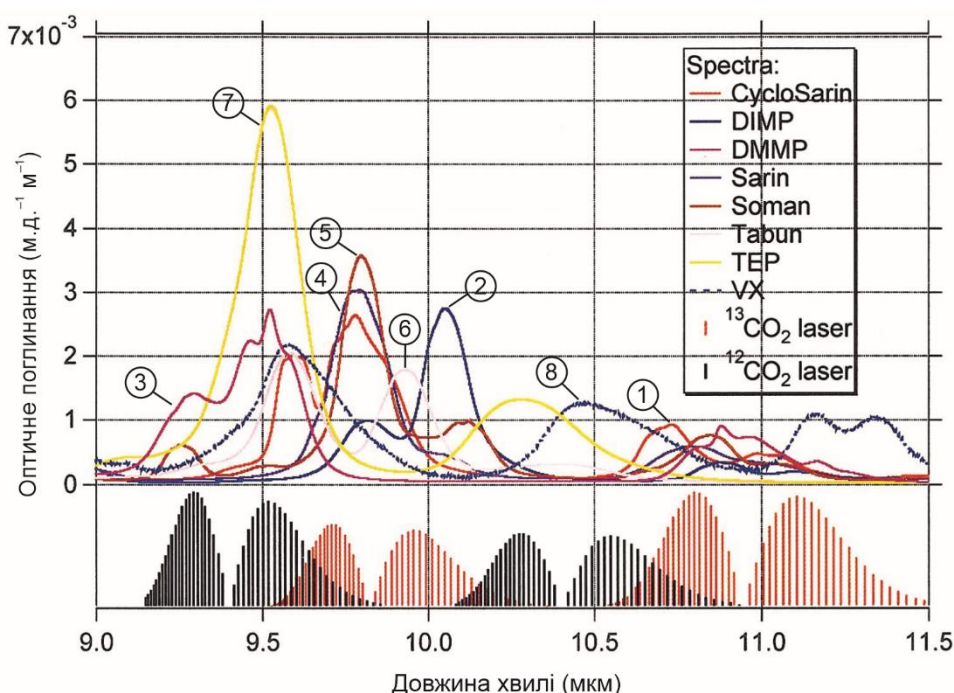


Рис. 1. Коливальні спектри поглинання бойових отруйних речовин нервово паралітичної дії: 1 – циклозарин, 2 – діізопропілметилфосфонат, 3 – диметилметилфосфонат; 4 – зарин, 5 – зоман, 6 – табун, 7 – триетилфосфат. Чорні та червоні вертикальні лінії – спектральні лінії випромінювання лазерів на основі $^{12}\text{CO}_2$ і $^{13}\text{CO}_2$ відповідно
Джерело розроблено авторами за даними [8, С. 6]

Як видно з рисунка, більшість бойових хімічних речовин (нервово-паралітичної дії, шкірно-наривної дії), вибухових речовин, тощо поглинають світло в смузі довжин хвиль від 3 мкм до 14 мкм. У діапазоні 3...14 мкм ці речовини мають дві різні групи смуг поглинання, тобто область довжин хвиль 3...4 мкм та 9...11 мкм. Технічно вимірюючі довжини хвиль не можуть бути реалізовані на одному імпульсному генераторі лазерного випромінювання. Діапазон довжин хвиль 9...11 мкм генерується CO_2 -лазерами та використовується для дистанційного виявлення бойових отруйних речовин [9], [10–12].

Діапазон довжин хвиль 3...4 мкм охоплюється лазерами на основі оптичного параметричного осцилятора (optical parametric oscillator (OPO), де твердотільні лазери є джерелом накачування та використовуються для дистанційного виявлення хімічних сполук. Системи лідарів з диференціальним поглинанням, що працюють у вищезгаданому спектральному діапазоні, здатні виявляти ці бойові отруйні хімічні речовини дистанційно.

Найбільш дослідженим зразком диференційного поглинаючого лідару, який застосовується військами країн-учасниць НАТО, є Falcon 4G (рис. 2) призначений для дистанційного виявлення БОР, виробництва компанії SEC Technologies, Словаччина [13].

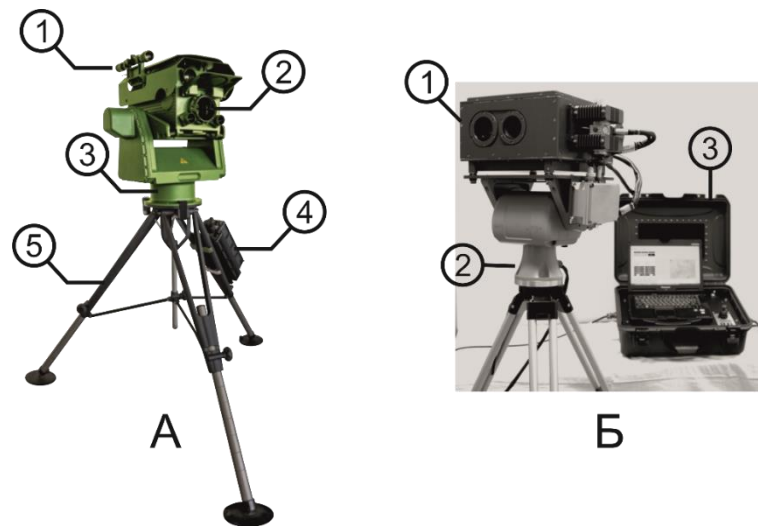


Рис. 2. Прилади хімічної дистанційної спектральної розвідки:

А – Falcon 4G (1 – оптичний візор, 2 – детектор; 3 – блок батареї та інтерфейс приладу; 4 – поворотний пристрій; 5 – тринога);

Б – ПХРДД-4 (1 – оптико-механічний блок з інтерферометром Майкельсона; 2 – поворотна платформа; 3 – блок керування та індикації)

Джерело розроблено авторами за даними [13; 16, С. 119]

Джерелом лазерного випромінювання є два імпульсні джерела CO_2 -лазера, що працюють у діапазоні довжин хвиль від 9,2 до 10,7 мкм, можуть бути налаштовані на 70 різних довжин хвиль для максимального охоплення БОР та промислових токсикантів. Використовувана імпульсна енергія становить 50 мДж (лінія 10P(20), 10,59 мкм) з частотою повторення імпульсів менше за 4 Гц. Миттєве поле зору приймача становить 0,001 рад.

Для забезпечення постійного оптичного спостереження визначеної ділянки місцевості використовується механічна основа з кількома ступенями свободи (пересування та нахил оптичної системи). Система здатна виявляти та ідентифікувати БОР та токсичні промислові матеріали на відстані до 6 км. Передбачено встановлення засобу на транспортний засіб з можливістю автоматичного сканування місцевості з полем огляду на 360 градусів або використовувати стаціонарно зі штатива. Система може виявляти бойові отруйні речовини, такі як табун (GA), зарин (GB), зоман (GD), циклозарин (GF), Ві-Ікс (VX), іприт (HD) та люїзит (L). Заявлена порогова концентрації виявлення БОВ становить 0,05 мг/м³ для GA, 0,10 мг/м³ для GB, 0,15 мг/м³ для GD, 0,40 мг/м³ для GF, 0,10 мг/м³ для VX, 1,25 мг/м³ для HD. Засіб також здатний виявляти різні токсичні промислові матеріали, такі як оцтова кислота, аміак, діетилетер, толуол, етанол, етилен, мурашина кислота, бензин, метанол, фторид сульфур, триетилфосфат та інші, які порівнюються з вбудованою поповнюваною базою даних еталонних спектрів. Час виявлення індивідуальної речовини складає 0,25 секунди вздовж лінії поля зору. Пристрій здатний формувати профіль концентрації визначуваної речовини на глибину до 1,5 км та має дальність виявлення до 6 км. Система успішно пройшла випробування незалежної організації TNO, виявивши менше 150 грамів фториду сульфур на відстані 5 км [14]. Важливою особливістю є можливість одночасного збереження результатів виявлення у вигляді текстових файлів та генерування повідомлення про ХБРЯ інцидент у форматі (STANAG) НАТО № 2103 АТР-45(E) “Попередження, звітування та прогнозування загроз інцидентів ХБРЯ характеру” (рис. 3), які гармонізовані з системою попередження і оповіщення про хімічну, біологічну, радіологічну та ядерну загрозу (інцидент) ХБРЯ, можуть бути доцільними для прискорення інформаційного обміну для формування донесень “ХБРЯ 4”, “ХБРЯ 5” [15].

```

Classification: NATO UNCLASSIFIED
VZCZCNBC000
R 141246Z NOV 2024
FM FALCON4G
TO CBRNANALYSIS
RT
EXER/NOBLE USA/-//
MSGID/CBRN 4 CHEM/APP-11(C)/CHANGE02/FALCON4G/-/NOV/-/-/-//
GEODATUM/WGE/UTM//
DTG/141246ZNOV2024//
ORIGDFT/SECTECH/UNIT/-/-/-/-/MFN/-/-//
CBRNTYPE/CHEM//
INDIA/-/1230/NKH/MSDS//
QUEBEC/18 396458E4380332N/VAP/MSDS/ACD//
ROMEO/CON:0.094136MGM3//
SIERRA/CON:141246ZNOV2024//
QUEBEC/18 396614E4380355N/VAP/MSDS/ACD//
ROMEO/CON:0.094136MGM3//
SIERRA/CON:141246ZNOV2024//
QUEBEC/18 396760E4380378N/VAP/MSDS/ACD//
ROMEO/CON:0.094136MGM3//
SIERRA/CON:141246ZNOV2024//
GENTEXT/CBRN INFO/DETECTOR FALCON4GV

```

Рис. 3. Зразок повідомлення про результати ХБР розвідки створені програмно й записані у вигляді текстового файлу у відповідності до (STANAG) НАТО № 2103 АТР-45(Е)

Джерело розроблено авторами за даними [16, С. 6]

З кінця 2000-х років у війська РХБ захисту російської федерації постачається пасивний дистанційний прилад хімічної розвідки (від рос. ПХРДД), а саме ПХРДД-1, ПХРДД-2, які є польовими спектрометрами інфрачервоного випромінювання (з Фур'є перетворенням). Пристрій ПХРРД-4 розроблений та виготовляється в Центрі прикладної фізики МДТУ ім. Н.Е. Баумана. Фур'є-спектрометр пасивного типу, призначений для дистанційного виявлення та ідентифікації хімічних з'єднань в атмосфері за час менше 1 с на відстані до 6 км [17]. Поворотна платформа приладу дозволяє здійснювати сканування в діапазоні 360 градусів за азимутом та від -15...+40 градусів за кутом місця. У межах цих кутів можливе як ручне наведення, так і задавання сектора сканування. Прилад дозволяє здійснювати автоматичний хімічний моніторинг повітряного середовища в режимі реального часу. Для виявлення та ідентифікації речовин на кожному із 32 елементів фотопомножуючого пристрою реєструється інтерферограма вхідного випромінювання та розраховується інфрачервоний спектр. Виявлення та ідентифікація хімічних сполук проводиться окремо за кожним із 32 спектрів шляхом порівняльного статистичного аналізу з базою даних еталонних спектрів. При виявленні хімічної сполуки видається інформація про її найменування, надійність виявлення, інтегральну концентрацію та кутові координати. Одночасне використання двох приладів ПХРДД-4 дозволяє здійснювати топографічну прив'язку виявленої хмари речовини, а також оцінити відстань до хмари речовини та її розміри. З відкритих джерел інформації відомо, що закінчена розробка військового панорамного приладу хімічної розвідки дистанційної дії (ПХРДД-5) [18].

Основними завданнями ХБР розвідки в діючій системі ХБРЯ захисту ЗС України, які можуть виконуватись дистанційно, є:

виявлення фактів ХБР зараження на пунктах управління, маршрутах висування, шляхах підвозу, евакуації, у районах зосередження та дій військ (сил), з метою оповіщення військ (сил) реагування та виконання (реалізації) заходів ХБРЯ захисту;

моніторинг (контроль) ХБР обстановки після застосування ЗМЗ(У) та/або руйнування промислово-небезпечних об'єктів. Об'єктами дій приладів дистанційної ХБР розвідки є маршрути висування, шляхах підвозу, евакуації, у районах зосередження та дій військ (сил).

Проте, утворення kill-zone, або “зон знищення” утворених внаслідок насичення безпілотними літальними апаратами (дронами-камікадзе, дронами спостереження, дронами-бомбардувальниками, дронами-винищувачами ін.), що становить близько 10 км по обидва боки лінії бойового зіткнення, що є смертельно небезпечною для будь-якої

техніки чи живої сили, суттєво зменшує безпечну глибину ведення ХБР розвідки. Цілком зрозуміло, що застосування наявних портативних індивідуальних чи мобільних напівавтоматичних засобів хімічної розвідки (ПРХР-МЕ, СРХБР-Т, АР4С-VB, LCD4, ChemProDM), розміщених на військовій техніці не забезпечує якісного виконання завдань і заходів ХБР розвідки на відстанях, які створюють додаткових ризиків ураження особового складу і військової техніки вищепереліченими безпілотними засобами. Зміна рівня ХБРЯ загроз може динамічно змінюватись у тому випадку, коли діючі або законсервовані підприємства хімічної промисловості, які є потенційним осередком руйнувань, поєднаних з вивільнення промислових токсичних матеріалів, охоплені або перебувають в географічній близькості до району ведення бойових дій.

Розробка та прийняття на озброєння спектральних приладів дистанційної хімічної розвідки з межею виявлення БОР та/або промислових токсичних речовин від 6 км включно з можливістю виявлення ділянок зараження місцевості суттєво покращить спроможності підрозділів військ (сил) ХБРЯ захисту ЗС України.

Висновки

Незважаючи на конвенційні заборони, БОР продовжують використовуватись досягнення воєнно-політичних цілей та для досягнення асиметричної переваги у військових конфліктах сучасності. Наявність у протиборчих сторін БОР, а також потенційні руйнування індустріальної інфраструктури з високим ступенем ймовірності вивільнення токсичних промислових матеріалів, є фактором підвищення різня ХБРЯ загроз. Враховуючи надзвичайну летальність БОР та невибірковість дії відносно військових цілей та цивільного населення, наголошується на тому, що своєчасне виявлення та ідентифікація БОР стає потребою часу. Аналіз сучасних тенденцій розвитку озброєння дистанційної розвідки вказує на те, що:

1. Країни-учасниці блоку НАТО та російської федерації вже опанували і розвивають новітні технології розвитку озброєння на основі спектроскопії диференційного поглинання лазерного випромінювання, інфрачервоного випромінювання для виявлення, ідентифікації, визначення концентрації та топографічної прив'язки осередків зараження до місцевості.

2. Розробка та постановка на озброєння спектральних приладів дистанційної хімічної розвідки є актуальним питанням комплексу заходів відсічі збройної агресії російської федерації та подолання її наслідків з огляду змін лінії бойового зіткнення протягом 2024–2025 років.

3. Широкі можливості з виявлення промислових токсичних речовин різної хімічної природи приладами дистанційної спектральної хімічної розвідки сприяють підвищенню ситуаційної обізнаності підрозділів Сил оборони, які виконують бойові (спеціальні) завдання на територіях, де розташовані об'єкти хімічної промисловості України.

Ефективна протидія потенційним хімічним загрозам залежить від прискореного опановування передових аналітичних методів виявлення БОР, а також започаткування й розвитку співпраці з міжнародними партнерським профільними організаціями для нарощування конструкторських потужностей виробництва сучасних засобів ХР розвідки.

Список літератури

1. Koblentz G. D. Chemical-weapon use in Syria: atrocities, attribution, and accountability. *The Nonproliferation Reviews*. 2016. Vol. 26. № 5–6. P. 575–598. URL: <https://doi.org/10.1080/10736700.2019.1718336>.
2. Report of the fact-finding mission regarding the incident of alleged use of toxic chemicals as a weapon in Douma, Syrian Arab republic, on 7 April 2018, OPCW Tech. Secretariat, The Hague, The Netherlands, Tech. Rep. S/1731/2019, Mar. 2019. URL: <https://reliefweb.int/report/syrian-arab-republic/note-technical-secretariat-report-fact-finding-mission-regarding>.
3. Kuca K., Nepovimova E. Are we facing NOVICE nerve agent threat? *Australasian Medical Journal*. 2019. Vol. 12. № 2. P. 49–52. URL: <https://doi.org/10.21767/AMJ.2018.3482>.

4. Veerabuthiran S., Razdan, A. LIDAR for detection of chemical and biological warfare agents. *Defence Science Journal*. 2011. Vol. 61. № 3. P. 241–250. URL: <https://doi.org/10.14429/dsj.61.556>.
5. Robinson R., Gardiner T., Innocenti F., Woods P., Coleman M., Infrared differential absorption lidar (DIAL) measurements of hydro-carbon emissions. *Journal of Environmental Monitoring*. 2011. Vol. 13. № 8. P. 2213. URL: <https://doi.org/10.1039/C0EM00312C>.
6. Innocenti F., Robinson R., Gardiner T., Finlayson A., Connor A., Differential absorption lidar (DIAL) measurements of landfill methane emissions. *Remote Sensing*. 2017. Vol. 9. № 9. P. 953. URL: <https://doi.org/10.3390/rs9090953>.
7. Milton M. J. T., Woods P. T., Jolliffe B. W., Swann N. R. W., McIlveen T. J. Measurements of toluene and other aromatic hydrocarbons by differential-absorption LIDAR in the near-ultraviolet. *Applied Physics B*. 1992. Vol. 55. № 1. P. 41–45. URL: <https://doi.org/10.1007/BF00348611>.
8. Webber M. E., Pushkarsky M., Patel C. K. N. Optical detection of chemical warfare agents and toxic industrial chemicals: Simulation. *Journal of Applied Physics*. 2005. Vol. 97. № 11. Art. No. 113101. URL: <https://doi.org/10.1063/1.1900931>.
9. Carlisle C. B., Van der Laan J. E., Carr L. W., Adam P., Chiaroni J. P., CO₂ laser-based differential absorption lidar system for range resolved and long range detection of chemical vapor plumes. *Applied Optics*. 1995. Vol. 34. P. 6187–6201. URL: <https://doi.org/10.1364/AO.34.006187>.
10. Geiko P. P., A. Tikhomirov. Remote measurement of chemical warfare agents by differential absorption CO₂ lidar. *Optical Memory and Neural Networks*. 2011. Vol. 20. № 1. P. 71–75. <https://doi.org/10.3103/S1060992X11010012>.
11. D. F. Flanagan. Short history of remote sensing of chemical agents. *Electro-Optical Technology for Remote Chemical Detection and Identification*. 1996. Vol. 2763. P. 2–17. URL: <https://doi.org/10.1117/12.243282>.
12. Leonard D. A., Driscoll T. A., Sweeney H. E. Detection of organophosphate vapors and liquids using a CO₂ lidar. *Optical Instruments for Weather Forecasting*. 1996. Vol. 2832. P. 20–31. URL: <https://doi.org/10.1117/12.258883>.
13. Our Technologies. Accessed: Dec. 08, 2025 URL: <https://www.sec-technologies.com/technology> (дата звернення: 10.12.2025).
14. Van der Meer M. J. A., Nieuwenhuizen M. S. Observer report about field tests with a FALCON 4G stand-off detector by SEC Technologie. Rijswijk, The Netherlands: TNO, 2016. URL: <https://resolver.tno.nl/uuid:605cde95-7f91-4af8-8868-f45996b132e4>.
15. “Інструкція функціонування системи попередження й оповіщення про хімічну, біологічну, радіологічну та ядерну загрозу (інцидент) у системі Міністерства оборони України” : наказ Міністерства оборони України від 22.03.2023 № 152/нм. Київ, 2023. 43 с.
16. Rehušová S. Falcon 4G demo at noble innovation day 2024. SEC Technologies. URL: https://www.sec-technologies.com/media/downloads/SEC_Technologies_Report_USA2024.pdf (дата звернення 10.12.2025).
17. Голяк Иг. С., Голяк Ил. С., Карфидов А. О., Королёв П. А., Морозов А. Н., Миронов А. И., Строков М. А., Табалин С. Е., Фуфурин И. Л., Панорамный фурье-спектрометр ПХРДД-4. *Приборы и техника эксперимента*. 2014. № 6. С. 119–120.
18. Петухов А. Н., Вильчик В. В., Шустикова Т. В., Имамов Д. М., Молчанов М. С. История развития отечественных средств химической разведки. *Вестник войск РХБ защиты*. 2024. Т. 8. № 1. С. 78-100.