

Оригінальна стаття

<https://doi.org/10.26565/2311-0872-2019-30-06>

УДК 535.361:535.555:535.573+577.3.0

СКР-ЛІДАР ДЛЯ ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ ПРИЗЕМНОГО ШАРУ АТМОСФЕРИ

В.П.Титар, О.В.Шпаченко

Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, 61022, м. Харків, м. Свободи, 4

E-mail: inhol@ukr.net

Надійшла до редакції 7 лютого 2019 р.

Актуальність. Розробка та впровадження у практику новітніх методів екологічного моніторингу атмосфери є в наш час актуальною задачею у зв'язку з постійно зростаючим техногенним забрудненням біосфери Землі. Особливо актуальним є дистанційний контроль газового складу приземного шару атмосфери в умовах промислової зони сучасного мегаполісу для обґрунтованого введення штрафних санкцій по відношенню до підприємств, чий викиди забруднюючих речовин перевищують встановлені норми.

Мета роботи – розробка екологічного СКР-лідара для контролю газового складу повітряного басейну великих мегаполісів та теоретична перевірка його ефективності для вирішення поставленої задачі.

Матеріали та методи. В основу розробленого лідара для екологічного моніторингу приземного шару атмосфери покладено метод спонтанного комбінаційного розсіяння (СКР), що обумовлено особливостями поставленої задачі. Метод СКР дозволяє проводити дистанційне визначення газового складу атмосфери на відстанях до декількох кілометрів з достатньо високим розрізненням (до 1 метра) та обчислювати абсолютну концентрацію забруднюючих газів, що виявляються в досліджуваній області повітряного простору, шляхом порівняння інтенсивності ліній-супутників забруднювача та азоту в зареєстрованому спектрі СКР.

Результати. Обґрунтовано вибір методу СКР для дистанційного лазерного контролю за станом приземного шару атмосфери в умовах великих промислових центрів. Представлено принципову блок-схему та основні технічні характеристики розробленого СКР-лідара. Проведено попередні розрахунки ефективності використання розробленого лідара для екологічного моніторингу повітряного басейну великих мегаполісів.

Висновки. Проведені розрахунки показали, що технічні характеристики розробленого СКР-лідара дозволяють проводити виявлення таких забруднюючих газів, як CO, NO₂, SO₂, CH₄, H₂S, C₆H₆ на відстанях до 200 м при їх концентраціях на рівні гранично допустимих значень у робочій зоні підприємства при роботі приймального каналу лідара в режимі накопичення сигналу протягом часу від 10 секунд до 4 хвилин. Такі характеристики дозволяють використовувати цей пристрій для оперативного дистанційного екологічного контролю за станом повітря в міській межі та поблизу промислових підприємств.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: лідар, спонтанне комбінаційне розсіяння, приземний шар атмосфери, екологічний контроль.

СКР-ЛИДАР ДЛЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ПРИЗЕМНОГО СЛОЯ АТМОСФЕРЫ

В.П.Титарь, О.В. Шпаченко

Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина, 61022, г. Харьков, пл. Свободы, 4

Актуальность. Разработка и внедрение в практику новейших методов экологического мониторинга атмосферы является в настоящее время актуальной задачей в связи с постоянно возрастающим техногенным загрязнением биосферы Земли. Особенно актуальным является дистанционный контроль газового состава приземного слоя атмосферы в условиях промышленной зоны современного мегаполиса для обоснованного введения штрафных санкций в отношении предприятий, чьи выбросы загрязняющих веществ превышают установленные нормы.

Цель работы – разработка экологического СКР-лидара для контроля газового состава воздушного бассейна крупных мегаполисов и теоретическая проверка его эффективности для решения поставленной задачи.

Матеріали і методи. В основу розробаного лідара для екологічного моніторингу приземного шара атмосфери положен метод спонтанного комбінаційного розсіяння (СКР), що обумовлено особливостями поставленої задачі. Метод СКР дозволяє проводити дистанційне визначення газового складу атмосфери на відстанях до декількох кілометрів з достатньо високим розрешенням (до 1 метра) і вичисляти абсолютну концентрацію виявляємих забруднюючих газів в досліджуваній області повітряного простору шляхом порівняння інтенсивності ліній-спутників забруднювача і азота в зареєстрованому спектрі СКР.

Результати. Обґрунтовано вибір методу СКР для дистанційного лазерного контролю за станом приземного шара атмосфери в умовах великих промислових центрів. Представлено принципову блок-схему і основні технічні характеристики розробаного СКР-лідара. Проведено попередні розрахунки ефективності використання розробаного лідара для екологічного моніторингу повітряного басейну великих мегаполісів.

Висновки. Проведені розрахунки показали, що технічні характеристики розробаного СКР-лідара дозволять здійснювати виявлення таких забруднюючих газів, як CO, NO₂, SO₂, CH₄, H₂S, C₆H₆ на відстанях до 200 м при їх концентраціях на рівні гранично допустимих значень в робочій зоні підприємства при роботі прийомного каналу лідара в режимі накоплення сигналу в часі від 10 с до 4 мин. Такі характеристики дозволять використовувати дане пристрій для оперативного дистанційного екологічного контролю за станом повітря в міській зоні і поблизу промислових підприємств.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: лідар, спонтанне комбінаційне розсіяння, приземний шар атмосфери, екологічний контроль.

SRS-LIDAR FOR ENVIRONMENTAL MONITORING ATMOSPHERIC SURFACE LAYERS

V.P. Titar, O.V. Shpachenko

V. N. Karazin Kharkiv National University, 4, Svobody Square, Kharkiv, 61022, Ukraine

Background: The development and implementation of new methods of environmental monitoring is an urgent problem due to the technogenic pollution of the Earth's biosphere. The remote control of the gas composition of the surface atmosphere layer in industrial zones of modern metropolis is important for determining penalties for enterprises whose emissions exceed established norms.

Objectives: Development of an ecological Spontaneous Raman Scattering (SRS) lidar for monitoring the gas composition in the air basin of large megacities. Theoretical verification of the lidar effectiveness for problem solving.

Materials and methods: The developed lidar for environmental monitoring of the atmospheric surface layer is based on the SRS method which allows remote monitoring of the atmospheric gas composition at distances up to several kilometers with a fairly high resolution (up to 1 meter). The absolute concentration of detected polluting gases is determined by comparing the intensities of the satellite pollutant and nitrogen lines in the recorded SRS spectra.

Results: The choice of the SRS method for remote laser monitoring of the atmosphere ground layer in large industrial centers is substantiated. The block diagram and the main technical characteristics of the developed SRS lidar are presented. Preliminary estimates of the lidar efficiency for the environmental monitoring were carried out.

Conclusions: The simulation results have shown that the specifications of the SRS lidar allow detecting of following polluting gases: CO, NO₂, SO₂, CH₄, H₂S, C₆H₆ at distances up to 200 m with the maximum permissible concentration level. The simulation results were obtained when accumulation time varied from 10 s to 4 min. The specification of the SRS lidar allow its using for remote monitoring of air conditions in the cities and near industrial enterprises.

KEYWORDS: lidar, spontaneous Raman scattering; atmosphere ground layer; environmental monitoring.

ВСТУП

Через постійне зростання техногенного забруднення біосфери Землі велику актуальність набуває розробка і впровадження в практику новітніх методів екологічного моніторингу.

Важливим напрямком екологічного моніторингу є одержання даних щодо стану приземного шару атмосфери у великих промислових центрах та сучасних мегаполісах. У цьому випадку велику роль відіграє оперативність одержання даних про джерела забруднення атмосфери: локалізація джерела, повний список забруднюючих речовин та їх кількість в досліджуваному об'ємі повітря. Такі задачі з

успіхом може вирішити мобільний голографічний газоаерозольний лідарний комплекс, який розробляється в лабораторії радіо- та оптичної голографії Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна [1-4]. Дана робота присвячена питанням створення газоаналізуючого каналу голографічного газоаерозольного лідарного комплексу, який також може бути з успіхом використаний в якості самостійного мобільного лідара для визначення газового стану приземного шару атмосфери [5].

ВИБІР МЕТОДУ ЛІДАРНОГО ЗОНДУВАННЯ

Лідарні методи зондування належать до так званих активних методів контролю забруднення оточуючого середовища, оскільки вони спираються на взаємодію лазерного випромінювання з різними компонентами атмосферного повітря. При лазерному зондуванні в основному використовуються наступні ефекти взаємодії хвилі світла із середовищем: аерозольне та молекулярне розсіювання, спонтанне комбінаційне (раманівське) розсіювання, а також резонансне поглинання. Як правило, у створюваних для контролю атмосфери установках використовується будь-який один із перерахованих вище ефектів, вибір якого залежить від поставленої задачі.

Метод диференційного поглинання ґрунтується на поглинанні енергії світла молекулами досліджуваного газу при співпаданні частоти випромінювання лазера із частотою електронного або коливально-обертального переходу даних молекул. Для технічної реалізації цього методу необхідно здійснювати зондування на двох частотах, одна з яких точно співпадає з резонансною частотою досліджуваних молекул, а друга – дещо від неї відрізняється (зазвичай різниця довжин хвиль складає близько 15 нм), що необхідно для врахування впливу на результати вимірювання аерозольного і молекулярного розсіювання та поглинання сторонніми речовинами [6]. Метод виявляється ефективним у тому випадку, коли застосовується режим часового накопичення і визначається середня концентрація досліджуваного газу уздовж стаціонарної траси, на одному кінці якої розташований зондувальний лазер, а на іншому – приймальний пристрій. Якщо приймач і випромінювач розташовуються поруч, то на іншому кінці траси поміщується відбивач.

При зондуванні атмосфери на двох частотах, одна з яких (ν_1) лежить на лінії поглинання, а інша (ν_2) поза нею, середню концентрацію газу \bar{N} на трасі довжиною z можна визначити за формулою [7]:

$$\bar{N} = \frac{\ln K (J_{\nu_1} / J_{\nu_2})}{2(\sigma_{\nu_1} - \sigma_{\nu_2})z} \quad (1)$$

де K – апаратурна константа, обумовлена відмінностями в енергії лазерів, пропусканні фільтрів та ін. на частотах ν_1 і ν_2 ; J_{ν_1} і J_{ν_2} – інтенсивності прийнятого випромінювання на двох частотах, що використовуються, після проходження зондувального імпульсу через досліджуваний шар атмосфери; σ_{ν_1} і σ_{ν_2} – поперечні перерізи поглинання на частотах ν_1 і ν_2 .

Формулу (1) можна застосувати за умови, що частоти зондувальних імпульсів не дуже відрізняються, а, отже, вплив молекулярного і аерозольного розсіювання на цих частотах на трансформацію сигналів зворотного розсіювання практично однаковий.

У випадку використання методу диференційного поглинання для лідарних вимірювань роль розподіленого у просторі рефлектора відіграє атмосферний аерозоль. При цьому просторове розрізнення виявляється невисоким (від 200 до 500 м), а чутливість методу знижується. До недоліків даного методу слід віднести необхідність точного налаштування лазерів, що застосовуються, на певну частоту, причому лазери повинні мати хорошу спектральну чутливість. Для визначення концентрації декількох газів методом диференційного поглинання необхідно застосовувати зондування на декількох парах довжин хвиль, що потребує або застосування в одному лідарі цілого ряду стабільних лазерів, або мінімум двох лазерів з частотою, яку можна перестроювати. Для дослідження приземного шару атмосфери метод диференційного поглинання ефективний при визначенні середніх концентрацій газів уздовж стаціонарної траси, коли необхідно виявити наявність дуже малих концентрацій одного досліджуваного газу, але при цьому немає необхідності визначати локалізацію джерел забруднення.

В умовах мегаполіса, де є різні джерела забруднення (промислове виробництво, автомобільний транспорт тощо), виникає необхідність оперативного визначення цілого ряду забруднюючих речовин з точною локалізацією джерел забруднення. Для цієї мети більше підходить метод спонтанного комбінаційного (раманівського) розсіювання (СКР) [8], який і було обрано нами при створенні лідара для контролю газового стану приземного шару атмосфери.

На відміну від методу диференційного поглинання, метод СКР має дещо меншу чутливість і дальність (до 2 км), однак він дає змогу одержувати практично миттєвий розподіл забруднювачів уздовж траси з високим просторовим розрізненням (порядку одного метра) [9]. До переваг методу СКР слід

віднести і той факт, що тут відпадає необхідність зондування на двох частотах і немає потреби у лазері з певною або перестроюваною частотою випромінювання.

Визначення хімічного складу атмосфери методом СКР засноване на аналізі спектра розсіяного назад випромінювання, в якому окрім ліній, що характеризують падаюче світло, спостерігаються додаткові лінії-супутники. Відміна в частотах збуджуючої первинної лінії і ліній кожного із супутників є характеристикою речовини, що розсіює, і дорівнює частотам власних коливань його молекул. Тому, на відміну від методу диференційного поглинання, список газів, що визначаються методом СКР, конструктивно нічим не обмежений.

Метод СКР дає змогу визначати концентрацію досліджуваного газу, користуючись залежністю між числом фотоелектронів $P(z, \lambda_R)$ в сигналі, який прийняла лідарна система на довжині хвилі СКР досліджуваного газу λ_R , і концентрацією цього газу $N(z)$ на відстані z від лідара. Ця залежність визначається виразом [9]:

$$P(z, \lambda_R) = n_0 K S \eta \frac{\Delta z}{z^2} \sigma_R N(z) \exp \left\{ -2 \int_0^z [\sigma_A(\xi, \lambda_0) + \sigma_M(\xi, \lambda_0) + \sigma_A(\xi, \lambda_R) + \sigma_M(\xi, \lambda_R)] d\xi \right\} \quad (2)$$

де n_0 – випромінене лідаром число фотонів; K – коефіцієнт пропускання оптики приймально-передаючої системи лідара; S – площа приймальної апертури лідара; η – квантова ефективність використаного в лідарі фотоприймача; Δz – інтервал спостереження (строб); σ_R – зворотний поперечний переріз СКР досліджуваної газової компоненти; λ_0 – довжина хвилі зондуючого лазерного імпульсу; $\sigma_A(\xi, \lambda_0)$, $\sigma_M(\xi, \lambda_0)$, $\sigma_A(\xi, \lambda_R)$, $\sigma_M(\xi, \lambda_R)$ – коефіцієнти аерозольного (A) і молекулярного (релеївського) (M) розсіювання на довжинах хвиль λ_0 і λ_R , відповідно.

Число фотонів n_0 в лазерному зондуючому імпульсі визначається виразом:

$$n_0 = \frac{W \lambda_0}{hc}, \quad (3)$$

де h – постійна Планка; c – швидкість світла; W – енергія в лазерному імпульсі.

Коефіцієнт молекулярного розсіювання в залежності від довжини хвилі λ можна визначити із рівняння Релеївського розсіювання наступним чином [10]:

$$\sigma_M(h, \lambda) = \frac{8\pi^3 (n^2 - 1)^2}{3\lambda^4} \frac{\rho(H)}{N}, \quad (4)$$

де $n = 1.00029$ – показник заломлення повітря; H – висота над рівнем моря атмосферної точки, в якій відбулося молекулярне розсіювання; $N = 2.504 \cdot 10^{25}$ – кількість молекул в одному кубічному метрі стандартної атмосфери; $\rho(H)$ – коефіцієнт щільності атмосфери.

Коефіцієнт щільності атмосфери можна апроксимувати експоненціальною функцією [10]:

$$\rho(H) = \exp \left(-\frac{H}{H_0} \right), \quad (5)$$

де $H_0 = 7994$ м називається приведеною висотою.

Коефіцієнт аерозольного розсіювання σ_A у формулі (2) визначається виразом [11]:

$$\sigma_A(\xi, \lambda) = \pi a^2 Q_s(x), \quad (6)$$

де a – радіус аерозольної частинки; $x = \frac{2\pi a}{\lambda}$ – параметр, який використовується в теорії Мі і являє собою розмір аерозольної частинки в відносних одиницях; $Q_s(x)$ – фактор ефективності розсіювання.

Функція $Q_s(x)$ обчислюється за формулами Мі та відомими константами речовини, з якої складається аерозоль [11].

Поперечний переріз СКР (σ_R) може бути одержаний теоретично в межах квантовомеханічної теорії взаємодії системи частинок з монохроматичним лінійно поляризованим світлом.

Використовуючи відоме рівняння Крамерса-Гейзенберга [12], диференційний переріз СКР $\frac{d\sigma}{d\Omega}$, віднесений до одиничного тілесного кута, до одиниці об'єму середовища і до однієї поляризації випромінювання, можна записати наступним чином [13, 14]:

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{N(2\pi)^4 \nu_0 \nu_R^3}{h^2 c^4} \left| \sum_i \left\{ \frac{M_{gi} M_{if}}{\nu_0 - \nu_i} + \frac{M_{gi} M_{if}}{\nu_R - \nu_i} \right\} \right|^2, \quad (7)$$

де ν_0 – частота випромінювання зондуючого імпульсу; ν_R – частота випромінювання СКР; ν_j – частота проміжного стану; M_{gi} і M_{if} – матричні елементи оператора Гамільтона, які пов'язують основний (початковий) стан квантової системи (g), що розглядається, з проміжним станом (i) і кінцевим станом (f).

Нажаль, точний розрахунок диференційного перерізу СКР за формулою (7) можливий лише для простих двоатомних молекул водню і дейтерію [15]. Тому зазвичай для розрахунків використовуються наведені нижче формули, одержані на основі теоретичного розгляду поляризованості молекул в полі випромінювання. В цьому випадку сумарний диференціальний переріз стоксівського та анти-стоксівського СКР-розсіювання у напрямку назад можуть бути описані формулами (8) і (9), відповідно [9]:

$$\left(\frac{d\sigma_j}{d\Omega}\right)_{Stokes} = \frac{A_j^2 (\nu_0 - \nu_j)^4 G}{c^4 [1 - \exp(-h\nu_j / k_B T)]} \left\{ \hat{\alpha}_j^2 + \frac{7}{45} \hat{\gamma}_j^2 \right\}, \quad (8)$$

$$\left(\frac{d\sigma_j}{d\Omega}\right)_{anti-Stokes} = \frac{A_j^2 (\nu_0 + \nu_j)^4 G}{c^4 [\exp(h\nu_j / k_B T) - 1]} \left\{ \hat{\alpha}_j^2 + \frac{7}{45} \hat{\gamma}_j^2 \right\}, \quad (9)$$

$$A_j = \frac{h}{4\pi^2 \nu_j}, \quad (10)$$

$$G = \frac{\pi^2}{\epsilon_0^2}, \quad (11)$$

де A_j – амплітуда нульових коливань j -ї моди молекули; ν_j – частота j -ї коливальної моди; k_B – постійна Больцмана; T – коливальна температура молекул; ϵ_0 – діелектрична проникність вакууму; $\hat{\alpha}_j^2, \hat{\gamma}_j^2$ – ізотропна і анізотропна частини тензора похідної поляризованості молекули за нормальною координатою q_i , де $q_j = q_{j0} \cos(2\pi\nu_j t + \delta_j)$.

Елементи матриць, що складають тензори $\hat{\alpha}_j^2$ і $\hat{\gamma}_j^2$, визначаються за експериментальними даними.

Для визначення концентрації газових компонентів за формулою (2) необхідне точне знання усіх параметрів, що входять до неї. Однак, з урахуванням того факту, що багато коефіцієнтів у формулі (2) залежать від довжини хвилі і для різних газів будуть різними, використовувати даний вираз на практиці виявляється не завжди зручно. Важливою перевагою методу СКР є те, що абсолютну концентрацію газових компонентів можна визначити шляхом порівняння інтенсивності супутників досліджуваних забруднювачів з інтенсивністю супутника, зумовленого одним із основних атмосферних газів – азотом або киснем, концентрація яких в приземній області атмосфери є відомою і достатньо стабільною в часі. При цьому із рівняння (2) лазерної локації для СКР виключаються складні атмосферні й інструментальні параметри, і концентрація газу, яка визначається, ($N_x(z)$) може бути вирахована за формулою:

$$N_x(z) = M \frac{P_x(z, \lambda_{Rx})}{P_{N_2}(z, \lambda_{RN_2})} \frac{\sigma_{RN_2}}{\sigma_{Rx}} N_{N_2}(z) \quad (12)$$

де M – апаратурна константа, яка обумовлюється відмінностями в коефіцієнтах пропускання оптики і чутливістю фотоприймача для довжин хвиль супутників λ_{Rx} і λ_{RN_2} ; $P_x(z, \lambda_{Rx})$ і $P_{N_2}(z, \lambda_{RN_2})$ – число зареєстрованих фотоелектронів при СКР на молекулах досліджуваного газу і молекулах атмосферного азоту, відповідно; σ_{Rx} і σ_{RN_2} – зворотні поперечні перерізи СКР досліджуваного газу і азоту; $N_{N_2}(z)$ – концентрація азоту.

До переваг СКР-методу також слід віднести високе просторове розрізнення (порядку одного метра) і достатньо високу чутливість без використання режиму часового накопичення сигналу.

ТЕХНІЧНИЙ ОПИС СКР-ЛІДАРА ТА ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ЙОГО РОБОТИ

Принципова блок-схема СКР лідара для контролю газового складу приземного шару атмосфери подана на Рис. 1.

Оскільки поперечні перетини комбінаційного розсіювання пропорційні четвертому ступеню частоти збуджуючого випромінювання [9], то в СКР-методі для збільшення дальності зондування краще використовувати ультрафіолетове випромінювання. Крім того, застосування довжин хвиль менше 270,0 нм відкриває можливість для цілодобових спостережень, оскільки дає змогу не враховувати фонову світлимість неба в денні години. В цьому випадку стоксові і антистоксові лінії-супутники газів, які визначаються, попадають в «сонячно-сліпу» область спектра, яка знаходиться в діапазоні від 200 нм до 300 нм.

З метою забезпечення більшої дальності зондування за рахунок збільшення зворотного поперечного перерізу СКР при зменшенні довжини хвилі зондуючого випромінювання, а також для можливості роботи в «сонячно-сліпому» діапазоні, нами був обраний неодимовий лазер з двократним подвоєнням частоти. Для цього в розробленій нами лідарній системі (Рис. 1) випромінювання імпульсного неодимового лазера 2 з довжиною хвилі $\lambda_0 = 1060$ нм подається на подвоювачі частоти 3 і 4, після проходження яких довжина хвилі стає відповідно $\lambda_1 = 530$ нм і $\lambda_2 = 265$ нм. В лазері використовується діодна накачка. Блок живлення лазера позначений на схемі цифрою 1.

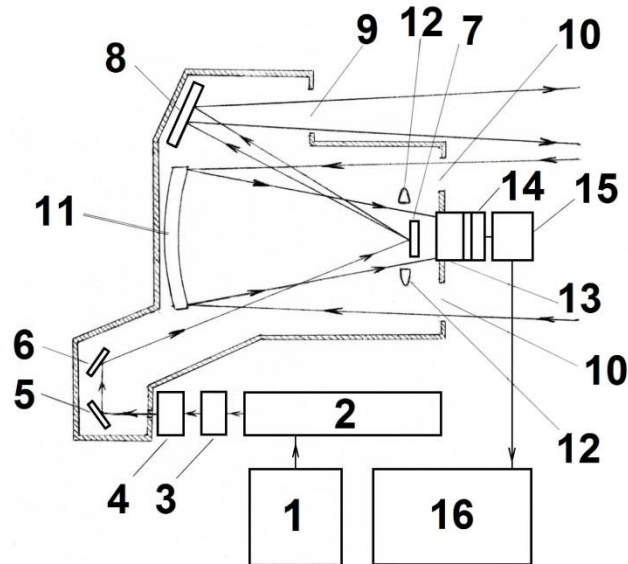


Рис. 1. Принципова блок-схема СКР лідара для контролю газового складу приземного шару атмосфери.

Енергія імпульсу основної гармоніки неодимового лазера складає 500 мДж, тривалість 6 нс, частота слідування імпульсів – 100 гц. Енергія імпульсу на довжині хвилі $\lambda_2 = 265$ нм складає 100 мДж.

Після проходження подвоювачів частоти 3 і 4 лазерний імпульс з довжиною хвилі $\lambda_2 = 265$ нм за допомогою поворотних дзеркал 5, 6 подається на скануюче дзеркало телескопа 7. Телескоп приймально-передаючої системи лідара побудований за схемою Кассегрена. Діаметр приймальної апертури телескопа складає 500 мм.

Скануюче дзеркало телескопа 7 разом із допоміжним дзеркалом 8 забезпечує спрямування зондуючих лазерних імпульсів через вихідне вікно 9 в потрібну область досліджуваного повітряного простору. Сканування простору зондуючими імпульсами по вертикалі і горизонталі за допомогою дзеркал 7 і 8 у поєднанні з технікою стробування дає змогу після обробки одержаних результатів відновлювати тривимірні зображення розподілу концентрацій забруднюючих газів.

Розсіяне у зворотному напрямку випромінювання, яке у своєму спектрі містить лінії-супутники, через вхідне вікно 10 попадає на фокусує дзеркало телескопа 11 і за допомогою оптичного коректора 12 та оптичної системи узгодження 13 через інтерференційний світлофільтр 14 подається на спектроаналізатор 15. Сигнали із спектроаналізатора передаються на комп'ютер 16 для подальшої обробки і візуалізації. Інтерференційний світлофільтр 14 відсікає випромінювання з довжиною хвилі $\lambda_2 = 265$ нм зондуючого імпульсу, яке є достатньо інтенсивним і при цьому не несе ніякої корисної інформації щодо забруднюючих газів, що визначаються методом СКР.

Для аналізу спектрів в розробленому лідарі використовується спектрометр «Ocean-FX» фірми «Ocean Optics» із збільшеною ефективністю в УФ-діапазоні [16]. Цей прилад дозволяє записувати до 4500 сканів в секунду. Прилад оснащений змінною щільною апертурою і може працювати в режимі накопичення сигналу, що можна використовувати для підвищення чутливості вимірювань, що проводяться за допомогою лідара.

Оцінка ефективності розробленого СКР-лідара була проведена з використанням формули (2) для деяких найбільш розповсюджених забруднюючих атмосферу речовин (CO , NO_2 , SO_2 , CH_4 , H_2S , C_2H_6). Нижче наведено технічні параметри розробленої лідарної системи, які були взяті для розрахунків.

Середній коефіцієнт пропускання оптики приймально-передавальної системи лідара на довжинах хвиль від 250 нм до 290 нм був узятий рівним 50%.

Використаний спектрометр «Ocean-FX» оснащений КМОП-матрицею «Hamamatsu S11639» [17], яка володіє підвищеною квантовою ефективністю в УФ діапазоні (від 45% і вище в залежності від довжини

хвилі). Для розрахунку було взято значення η в діапазоні ві 250 нм до 290 нм, яке дорівнює 40%. Співвідношення сигнал/шум в спектрометрі, що використовується, при одиночному скануванні дорівнює 400:1.

Під час комп'ютерного моделювання роботи СКР-лідара можна знехтувати експоненціальною залежністю щільності атмосфери від висоти (5), оскільки пристрій, що розробляється, призначений для зондування приземного шару атмосфери на висотах близько кілометра, де щільність атмосфери $\rho(H)$ можна вважати постійною і прийняти її за одиницю. Розрахунки проводилися для прозорої атмосфери, для якої розсіяння від фонового аерозолу приблизно дорівнює молекулярному розсіянню (див. [18]), що визначається формулою (4).

Було проведено розрахунки для низки типових забруднюючих газів. При цьому вміст в атмосфері CO, NO₂, SO₂, H₂S, C₆H₆ було взято на рівні гранично допустимих концентрацій (ГДК) в робочій зоні підприємств [19]. Використані для розрахунків концентрації та комбінаційні зсуви частоти для перерахованих забруднюючих газів наведені в Табл. 1. Масова концентрація азоту в приземному шарі стандартної атмосфери була взята рівною 75,51% [20].

Таблиця 1. Концентрації і комбінаційні зсуви частоти забруднюючих газів, що було використано для розрахунків

Газ	Комбінаційний зсув частоти (см ⁻¹) [15]	Концентрація	
		(мг/м ³)	(ppm)
CO	2145	20	17,2
NO ₂	1320	5	2,6
SO ₂	1151,1	10	3,8
CH ₄	2914	30	45,1
H ₂ S	2611	10	7,1
C ₂ H ₆	3072	15	6,2

Оціночні розрахунки ефективності роботи лідара проводилися за формулою (2) в припущенні, що траса зондування є однорідною. В цьому випадку коефіцієнти аерозольного та молекулярного розсіяння, що стоять під знаком інтеграла, є константами, так що інтегрування за просторовою координатою дає тільки відстань до точки зондування. На Рис. 2-4 наведені результати розрахунків для траси зондування від 50 м до 200 м.

Під час комп'ютерного моделювання роботи лідара в режимі накопичення сигналу нами було враховано, що значення n_0 , яке входить до формули (2), визначається не тільки виразом (3), але й також пропорційно часу накопичення. Оскільки різні гази мають різні значення зворотного поперечного перерізу СКР (σ_r) і, окрім того, розрахунки проводилися для концентрацій, різних для різних газів (див. Табл. 1), то для досягнення приблизно однакових результатів для різних газів потрібен різний час накопичення сигналу. Це добре видно з Рис. 2, де зліва від осі ординат поряд з хімічною формулою забруднюючих газів вказано час накопичення сигналу, для якого було розраховано наведені графіки.

З урахуванням того, що n_0 пропорційно часу накопичення сигналу, нами також було проведено розрахунки залежності часу виявлення досліджуваних забруднюючих газів від відстані до точки зондування, які представлені на Рис. 3. Як видно із графіків на Рис. 3, потрібний час накопичення сигналу різко зростає з відстанню за законом, близьким до квадратичного. Розрахунки показали, що для виявлення досліджуваних нами забруднюючих газів при їх концентрації, що дорівнює ГДК в робочій зоні підприємства, на відстані у півкілометра потрібно проводити режим накопичення сигналу протягом десятків хвилин (наприклад, 10 хвилин для CH₄, 36 хвилин для C₆H₆), що, безумовно, знижує оперативність у роботі розробленої лідарної системи і робить проблематичним побудову тривимірного просторового розподілу газу, що виявляється, оскільки при наявності вітру за десятки хвилин відбудеться перемішування повітряних мас. Однак, як видно з графіків на Рис. 3, при дальності виявлення у 200 м режим накопичення становить для досліджуваних газів від 11 секунд (для CH₄) до 4 хвилин (для CO), що є цілком прийнятним з точки зору оперативності вимірів, які проводяться лідаром.

Нами також було проведено розрахунки відношення кількості фотоелектронів, зареєстрованих лідарною системою на лінії СКР досліджуваного газу, до кількості фотоелектронів, зареєстрованих на лінії СКР азоту. Як було вже сказано вище, таке відношення (P_x / P_{N_2}) входить до формули (12) і

використовується під час практичних натурних вимірювань концентрації забруднюючих газів методом СКР. Результати комп'ютерного моделювання залежностей (P_x / P_{N_2}) від відстані до точки зондування для різних забруднюючих газів представлено на Рис. 4, де, як і на Рис. 2, зліва від осі абсцис поруч з формулою газу позначено час накопичення сигналу, для якого було проведено розрахунки.

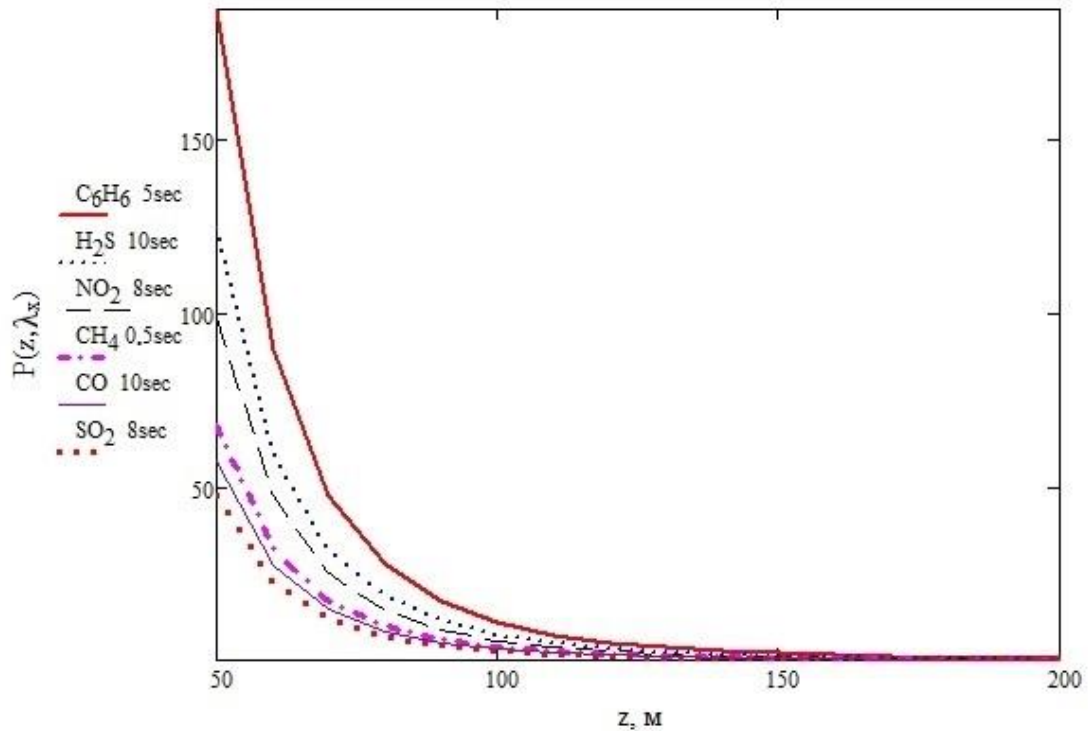


Рис. 2. Кількість зареєстрованих лідарною системою фотоелектронів $P_x(z, \lambda_{rx})$ в залежності від відстані до точки зондування (z) для різних досліджуваних газів.

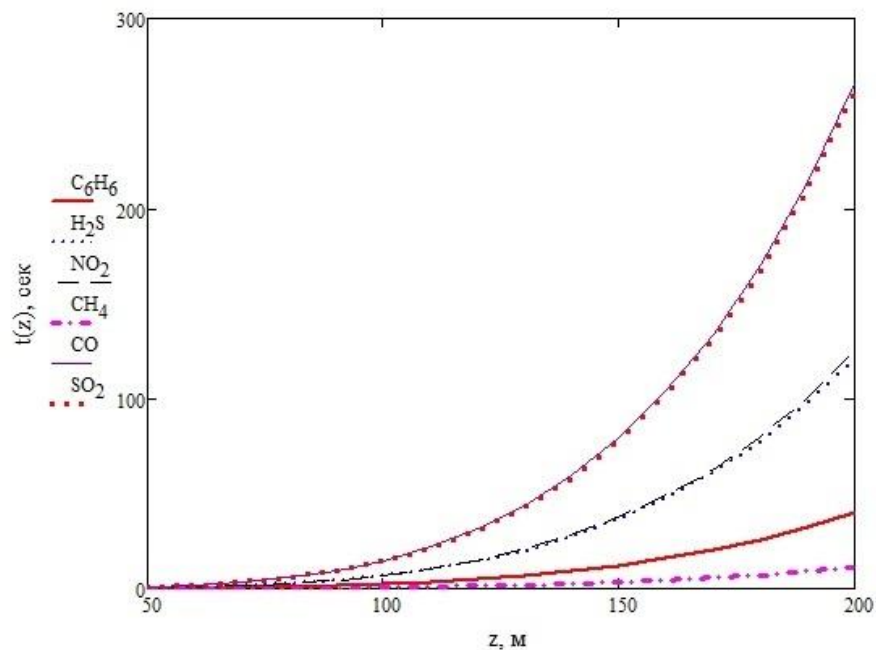


Рис. 3. Залежність часу виявлення досліджуваних забруднюючих газів від відстані до точки зондування.

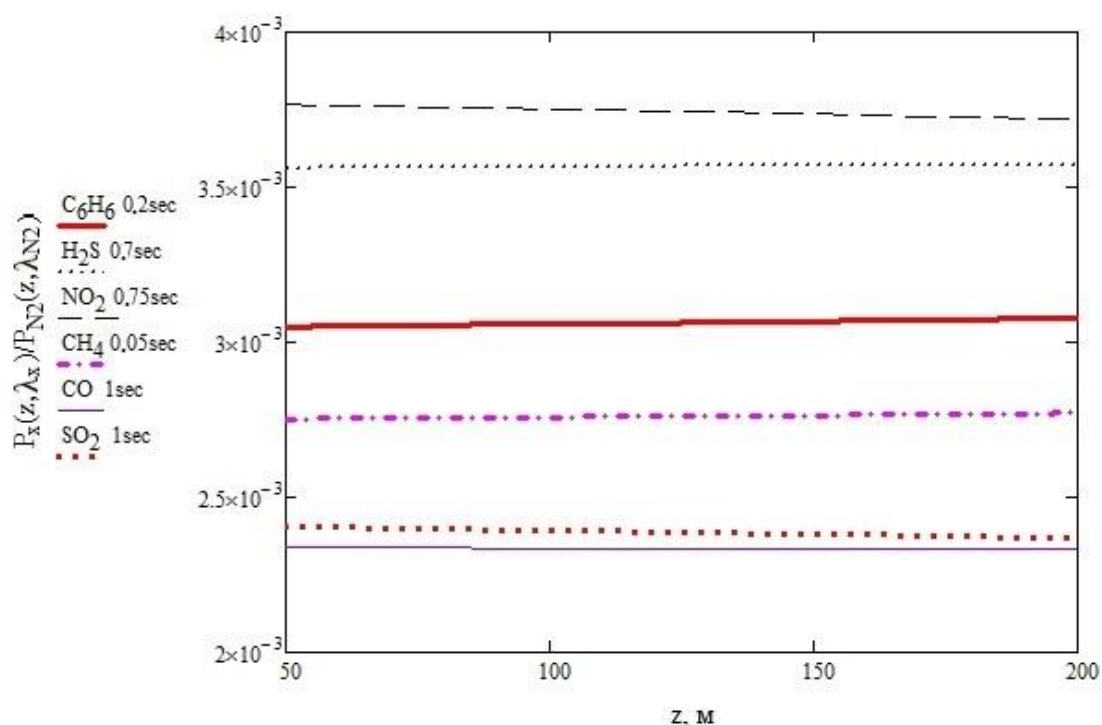


Рис. 4. Залежність від відстані до точки зондування (z) відношення сигналу, зареєстрованого на лінії СКР досліджуваного газу, до сигналу, зареєстрованого на лінії СКР атмосферного азоту.

Оскільки азот є основною газовою компонентою атмосфери, інтенсивність сигналу, що прийнятий на лінії СКР азоту, на багато порядків перевищує інтенсивність сигналу, що прийнятий лідарною системою на лінії СКР будь-якого забруднюючого газу. Наприклад, при відстані до точки зондування у 50 метрів і режимі накопичення протягом 1 секунди кількість фотоелектронів для лінії азоту, розрахована за формулою (2), дорівнює $2,455 \cdot 10^5$, в той час, як для CO з тою ж самою тривалістю накопичення сигналу та з тою ж відстанню кількість зареєстрованих фотоелектронів становить всього 6 штук. Тому представляє інтерес порівняти відношення слабкого сигналу (P_x) до інтенсивного сигналу (P_{N_2}) з чутливістю розробленої лідарної системи.

Якщо припустити, що чутливість лідарної системи обмежується внутрішніми шумами спектрометра, що використовується, то порогова чутливість буде відповідати величині, що є зворотною значенню відношення сигнал/шум, і у нашому випадку буде дорівнювати $2,5 \cdot 10^{-3}$. Як видно з графіків, представлених на Рис. 4, величина відношення (P_x / P_{N_2}) перевищує порогову чутливість в усьому діапазоні розглянутих відстаней до точки зондування при роботі в режимі накопичення сигналу від 0,05 с (для CH₄) до 1 с (для CO і SO₂). При цьому для частини забруднюючих газів, таких як CO, NO₂, SO₂, графіки (P_x / P_{N_2}) слабо спадають, в той час як для CH₄, H₂S та C₆H₆ прийнятий сигнал, нормований на лінію СКР азоту, дещо зростає з відстанню. Це пов'язано з тим, що коефіцієнт молекулярного (релеївського) розсіяння (σ_M), який входить під знак експоненти, для CO, NO₂, SO₂ виявляється більшим, ніж відповідний коефіцієнт молекулярного розсіяння для азоту, а для CH₄, H₂S і C₆H₆ σ_M менше, ніж для N₂. Задля наочності в Табл. 2 наведені значення коефіцієнтів молекулярного розсіяння для розглянутих газів, розраховані за формулою (4).

Таблиця 2. Розраховані коефіцієнти молекулярного розсіяння σ_M для довжини хвилі зондуючого випромінювання $\lambda = 265$ нм

Газ	N ₂	CO	NO ₂	SO ₂	CH ₄	H ₂ S	C ₆ H ₆
$\sigma_M, \text{ м}^{-1}$	$1,746 \cdot 10^{-4}$	$1,783 \cdot 10^{-4}$	$1,954 \cdot 10^{-4}$	$1,990 \cdot 10^{-4}$	$1,634 \cdot 10^{-4}$	$1,691 \cdot 10^{-4}$	$1,604 \cdot 10^{-4}$

ВИСНОВКИ

Розроблений СКР-лідар має хороші технічні характеристики, які дозволяють проводити виявлення забруднюючих речовин в приземному шарі атмосфери на рівні одиниць ppm при дальності виявлення до 200 м як в нічний, так і в денний час з розрізненням по дальності 1 м при роботі в режимі накопичення сигналу від 10 с до 4 хв. Такі параметри дозволять використовувати даний пристрій для оперативного дистанційного екологічного контролю за станом повітря в міській межі і поблизу промислових підприємств. Добре просторове розрізнення забезпечить виявлення джерел забруднення атмосфери з великою точністю, що, зокрема, є необхідною умовою при визначенні штрафних санкцій по відношенню до підприємств, які порушують екологічні норми.

КОНФЛІКТ ІНТЕРЕСІВ

Автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів.

Authors' ORCID ID

Титарь В.П. <https://orcid.org/0000-0002-4874-8929>

Шпаченко О.В. <https://orcid.org/0000-0002-6072-5340>

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Титарь В.П., Шпаченко О.В. Голографический лидар для экологического мониторинга атмосферы // Вісник Харківського національного університету ім. В.Н.Каразіна. Радіофізика та електроніка. 2001. Вип. 1. № 513. – С 151-160.
2. Титарь В.П., Шпаченко О.В. Поляризаационные голографические методы лидарного контроля за состоянием атмосферы // Электромагнитные явления. 2001. Т. 2. № 1(5). – С. 111-117.
3. V. P. Titar, O. V. Shpachenko, V. I. Yartsev, "Mobile holographic lidar", International Conference on Laser and Fiber-Optical Networks Modeling (LFNM), June 29 – July, Kharkiv, Ukraine, 2006, pp. 187–190.
4. Титарь В.П., Шпаченко О.В., Ярцев В.И. Мобильный голографический лидар // Экология и здоровье человека. Охрана воздушного и водного бассейнов. Утилизация отходов. Сб. науч. статей 15-й Междунар. науч.-практ. конф., г.Щелкино, АР Крым, 4-8 июня 2007 г. – Харьков, 2007. – С. 254-258.
5. Titar V.P., Shpachenko O.V. Raman lidar for monitoring gas composition of the atmosphere ground layer // Proceeding of 8-th International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers (CAOL'2019), 6-8 September, 2019. – Sozopol, Bulgaria, 2019. – P. 480 - 483.
6. S. Ismail and E. V. Browell, "Differential absorption lidar", "Encyclopedia of Atmospheric Sciences", 2015. Edition 2, pp. 277–288.
7. G.G. Gimmestad, "Differential-absorption lidar for ozone and industrial emissions" in "Lidar: Range-Resolved Optical Remote Sensing of the Atmosphere", Springer, 2005, pp. 187–212.
8. J. Ruzankina, V. Elizarov, L. Konopel'ko, A. Zhevlakov, A.Grishkanich, "Raman lidar with for geoeological monitoring", Journal of Physics: Conference Series, vol. 1124, pp. 051036, 2018.
9. U. Wandinger, "Raman lidar" in "Lidar: Range-Resolved Optical Remote Sensing of the Atmosphere", Springer, 2005, pp. 241–271.
10. T. Nishita, T. Sirai, K. Tadamura, E. Nakamae, "Display of the earth taking into account atmospheric scattering" Proceedings of the 20th Annual Conference on Computer graphics and interactive techniques (SIGGRAPH '93), 02 – 06 Aug., Anaheim, USA, 1993, pp. 175-182.
11. Дейрменджан Д. Рассеяние электромагнитного излучения сферическими полидисперсными частицами. – М.: Мир, 1971. – 165 с.
12. Гайтлер В. Квантовая теория излучения. – М.: Изд-во иностранной литературы, 1956. – 491 с.
13. Бломберген Н. Нелинейная оптика. – М.: Мир, 1966. – 424 с.
14. W.K. Bischel and G. Black, "Wavelength dependence of Raman scattering cross sections from 200-600 nm", in "Eximer Lasers-1983", AIP Conference Proceedings, vol. 100, pp. 181 – 187, 1983.
15. Межерис Р. Лазерное дистанционное зондирование. – М.: Мир, 1987. – 550 с.
16. Ocean FX Miniature Spectrometer User Manual. https://oceanoptics.com/wp-content/uploads/Ocean-FX_Users_Guide_Ver_01.5.pdf
17. Hamamatsu Image Sensors. Selection guide. – June 2019. https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/image_sensor_kmpd0002e.pdf
18. Разенков И.А. Аэрозольный лидар для непрерывных атмосферных наблюдений // Оптика атмосферы и океана. 2013. Т. 26, № 1. – С. 52 – 63.
19. Гранично допустимі концентрації (ГДК) хімічних чинників у повітрі робочої зони, затверджені ГДСЛ від 17.07.2015. <http://normativ.ua/sanpin/tdoc27838.php>
20. Сорохтин О.Г., Ушаков С.А. Развитие Земли. – М.: Изд-во МГУ, 2002. – 506 с.