

**ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ШИРИНЫ ЛИНИИ ЛАЗЕРНОГО
ИЗЛУЧЕНИЯ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЛИДАРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ
РАДИОАКТИВНЫХ И ОТРАВЛЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ**

Романюк В.А.

Национальная академия Национальной гвардии Украины

Нестеренко С.В.

*Харьковский национальный университет городского хозяйства
имени А.Н. Бекетова*

Кириенко Н.М., Иванова О.П.

*Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства
имени Петра Василенко*

В настоящее время в мире сосредоточены значительные количества опасных химических веществ, которые при попадании в окружающую среду в условиях чрезвычайных ситуаций (ЧС) могут создавать угрозу массового поражения людей, наносить ущерб природе, заражая значительные территории. В Украине насчитывается 931 объект, где хранятся или используются в производственной деятельности 308,07 тыс. т опасных химических веществ (ОХВ), в том числе 4,08 тыс. т хлора, 202,66 тыс. т аммиака и 101,33 тыс. т других опасных химических веществ. Как следствие, в случае чрезвычайных ситуаций (ЧС) в зону химического поражения могут попасть более 250 районов, где проживает около 20 млн человек. Химическую опасность создает и накопления отходов, общий объем которых превышает 35 млрд т [1]. Поэтому контроль за состоянием экологической обстановки вблизи крупных технологических комплексов с целью предотвращения крупномасштабных аварий является важной межгосударственной проблемой. Однако проводимые меры по защите окружающей среды на этих предприятиях и полигонах по уничтожению высокотоксичных материалов недостаточны. Существует большая вероятность аварийных выбросов высокотоксичных молекулярных соединений, образующихся в процессе переработки ядерного топлива, утилизации оружейного урана и плутония, запасов радиоактивных (РВ), отравляющих (ОВ), сильнодействующих ядовитых веществ (СДЯВ) и т.д.

Актуальность задач оперативного контроля за газовыми и аэрозольными выбросами опасных энергетических и промышленных объектов резко возрастает. В первую очередь речь идет о возможных последствиях аварийных ситуаций на производствах ядерного топливного цикла (ЯТЦ), связанных не только с выбросами РВ, но и ряда высокотоксичных соединений. Наконец, в последние годы одной из самых актуальных государственных задач становится борьба с различными проявлениями (в т.ч. с радиационными, химическими и т.д.) террористической деятельности.

В данной работе рассмотрены возможности имеющихся на сегодняшний день активных методов дистанционного зондирования (контроля) РВ и ОВ, основанные на достижениях спектроскопии поглощения. Проведены исследования влияния ширины линии лазерного излучения на эффективность лидарных измерений. Они показывают, что изменение соотношения полуширины линии лазерного излучения и полуширины линии поглощения исследуемого газа приводит к необходимости учета систематической ошибки измерений, связанной с конечной шириной линии лазерного излучения.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, полуширина линии лазерного излучения, линия поглощения.

Постановка задачи и анализ литературы. Дистанционное обнаружение и идентификация опасных веществ в атмосфере на сегодняшний день является актуальным. На данный момент исследуются и разрабатываются новые методы для точного и оперативного анализа веществ в атмосфере: метод импульсной терагерцовой спектроскопии, терагерцовая спектроскопия на основе квантово-каскадных лазеров, также ведутся исследования методов диодной лазерной спектроскопии, лазерно - индуцированной флуоресценции, лазерно-искровой эмиссионной спектроскопии, лазерной оптико-акустической спектроскопии [2].

Рассматриваются физические принципы активных и пассивных методов дистанционного обнаружения радиоактивных (РВ) и отравляющих (ОВ) веществ в атмосфере, измерения параметров штатных и/или аварийных газово-аэрозольных выбросов и скоплений фрагментов и микрочастиц РВ и ОВ на различных поверхностях, позволяющие решать ряд уникальных задач мониторинга окружающей среды. Проанализированы современные тенденции развития этих методов в различных спектральных диапазонах [3].

Вместе с тем, очевидно, что существует потребность в эффективных и чувствительных методах дистанционного контроля РВ и ОВ, которые обеспечивают личную безопасность операторов при проведении измерений в агрессивных средах при высоких уровнях радиации или аномальных температурных режимах измерений. Остро нужны мобильные (носимые и возимые) измерительные комплексы, позволяющие с достаточной чувствительностью вести дистанционные измерения в реальном времени. Следует отметить, что современное состояние научных исследований позволяет рассчитывать на создание в ближайшее время таких комплексов, основанных, прежде всего, на оптических (лазерных) методах измерения [3].

Изложение основного материала. В процессе исследования следа РВ/ОВ часто не учитывалось влияние ширины линии лазерного излучения на точность измерений. Вместе с тем проводились исследования, показывающие влияние параметров исследуемой области на спектральные характеристики загрязняющих газов, особенно если измерения проводились в непосредственной близости от источника загрязнения. Было отмечено, что в этом случае характерно уширение температурой и давлением, и контур линии поглощения является лоренцевским. Рассмотрим спектральный диапазон, в котором это влияние существенно.

Для каждой молекулы дифференциальное поглощение можно использовать на любой длине волны, где существует ярко выраженная полоса поглощения. Хотя фактически все молекулы обладают интенсивными электронными линиями поглощения, лишь для некоторых из них эти линии расположены в спектральной области, позволяющей осуществлять лазерное зондирование этих молекул в атмосфере. В то же время в ИК диапазоне спектра много колебательно-вращательных линий молекул. Хотя в нижних слоях атмосферы уширение линий поглощения за счет соударений между молекулами сильно искажает их форму, но изучение возможности зондирования атмосферы с помощью лазера, установленного на борту космического корабля, показало полезность применения с этой целью лидаров дифференциального поглощения и рассеяния (ДПР) в ультрафиолетовой (УФ) и инфракрасной (ИК) областях спектра [4, 5, 6].

При лидарных измерениях методом дифференциального поглощения в УФ спектральном диапазоне нетрудно добиться, чтобы ширина линии лазерного излучения была меньше ширины линий поглощения исследуемых молекул. Так как линии поглощения основных загрязняющих газов находятся в ИК спектральном диапазоне, он является перспективной областью для расширения измерений с помощью лидаров ДПР благодаря возможности большего выбора молекул с подходящими колебательно-вращательными переходами. Обычно ширина линий в колебательно-вращательном спектре почти в сто раз уже линий в электронных спектрах поглощения. Это означает, что ширина линий лазерного излучения часто становится сравнимой с шириной линии поглощения исследуемой молекулы [4, 5].

Следовательно, лазерное излучение, используемое для дистанционного зондирования в ИК диапазоне, нельзя рассматривать как монохроматическое. В этом случае возникает необходимость исследовать влияние ширины линии лазерного излучения на эффективность лидарных измерений. Для лазера с широкой полосой излучения, центр которой соответствует длине волны λ_0 , уравнение для упругого рассеяния можно записать в виде [6]:

$$E(\lambda_0, R) = \frac{c\tau_d Y\xi(R)}{2R^2} \int_{\lambda_0 - \Delta_c}^{\lambda_0 + \Delta_c} d\lambda(\xi) \beta(\lambda, R) E(\lambda) E^{-2 \int_0^R K(\lambda, R) dR}, \quad (1)$$

где $E(\lambda)$ – спектральное распределение энергии, излучаемой лазером;
 Δ_c – полуширина спектрального пропускания приемной оптической системы;

$$K(\lambda, R) = \bar{K}(\lambda, R) + N(R)\sigma(\lambda), \quad (2)$$

где $K(\lambda, R)$ – коэффициент ослабления за вычетом вклада поглощения анализируемых молекул;
 $N(R)$ – концентрация этих молекул на расстоянии R ;
 $\sigma(\lambda)$ – спектральное сечение поглощения молекул газа.

Учитывая соотношение (2) и узость интервала интегрирования по λ в (1), при котором можно считать постоянными величинами коэффициенты как рассеяния излучения в обратном направлении, так и ослабления (за вычетом поглощения), выражение (1) можно представить в следующем виде:

$$E(\lambda_0 R) = \frac{c\tau Y \xi(R) \beta(\lambda_0, R)}{2R^2} \exp\left(-2 \int_0^R \bar{K}(\lambda_0, R) dR\right) \left[\int_{\lambda_0 - \Delta_c}^{\lambda_0 + \Delta_c} d\lambda \xi(\lambda) E(\lambda) e^{-2 \int_0^R K_A(\lambda, R) dR} \right], \quad (3)$$

где

$$\bar{K}(\lambda, R) \equiv N(R) \sigma_A(\lambda) \quad (4)$$

является коэффициентом поглощения исследуемых молекул.

Для значений энергии рассеянных сигналов на длине волны λ_0 , принятых с расстояния $(R + \Delta R)$, ΔR размер загрязняющего шлейфа, соотношение (3) примет следующий вид:

$$E(\lambda_0, R + \Delta R) = \frac{c\tau_d Y(R + \Delta R) \beta(\lambda_0, R + \Delta R)}{2(R + \Delta R)^2} \exp\left(-2 \int_0^{R + \Delta R} \bar{K}(\lambda_0, R) dR\right) \times \left[\int_{\lambda_0 - \Delta_c}^{\lambda_0 + \Delta_c} d\lambda \xi(\lambda) E(\lambda) \exp\left(-2 \int_0^{R + \Delta R} K_A(\lambda, R) dR\right) \right]. \quad (5)$$

Аналогичным образом можно получить выражения для энергии рассеянных сигналов на длине волны λ_ω , учитывая при этом отсутствие фактически поглощения на этой длине волны. Тогда

$$E(\lambda_\omega, R) = \frac{c\tau Y(R) \beta(\lambda_\omega, R)}{2R^2} \exp\left(-2 \int_0^R \bar{K}(\lambda_\omega, R) dR\right) \left[\int_{\lambda_\omega - \Delta_c}^{\lambda_\omega + \Delta_c} d\lambda \xi(\lambda) E(\lambda) \right], \quad (6)$$

$$E(\lambda_\omega, R + \Delta R) = \frac{c\tau Y(R + \Delta R) \beta(\lambda_\omega, R + \Delta R)}{2(R + \Delta R)^2} \exp\left(-2 \int_0^{R + \Delta R} \bar{K}(\lambda_\omega, R) dR\right) \times \left[\int_{\lambda_\omega - \Delta_c}^{\lambda_\omega + \Delta_c} d\lambda \xi(\lambda) E(\lambda) \right]. \quad (7)$$

В методе ДПР значение измеренной концентрации газовой компоненты зависит от отношения энергий рассеянных сигналов на двух разных длинах волн (λ_0 и λ_ω), принятых с расстояний R и $(R + \Delta R)$. В этом случае с учетом формул (3), (4), (5), (6), (7) и условия $R \ll \Delta R$ можно получить выражение, определяющее возможные ошибки измерений, связанные с реальной шириной линии зондирующего излучения:

$$\frac{E(\lambda_\omega, R + \Delta R) * E(\lambda_0, R)}{E(\lambda_\omega, R) * E(\lambda_0, R + \Delta R)} = \frac{\beta(\lambda_\omega, R) * \beta(\lambda_0, R + \Delta R)}{\beta(\lambda_\omega, R + \Delta R) * \beta(\lambda_0, R)} \times$$

$$\times e^{-2\tau_\varepsilon} \frac{\int_{\lambda_0 - \Delta_c}^{\lambda_0 + \Delta_c} d\lambda \xi(\lambda) E(\lambda) \exp(-2 \int_0^{R_1} N(R) \sigma^A dR)}{\int_{\lambda_0 - \Delta_c}^{\lambda_0 + \Delta_c} d\lambda \xi(\lambda) E(\lambda) \exp(-2 \int_0^{R_2} N(R) \sigma^A dR)}, \quad (8)$$

где

$$\tau_\varepsilon = \int_0^{R + \Delta R} [\bar{K}(\lambda_\omega, R) - \bar{K}(\lambda_0, R)] dR + \int_0^R [\bar{K}(\lambda_\omega, R) - \bar{K}(\lambda_0, R)] dR. \quad (9)$$

Учитывая относительную узость спектрального диапазона и незначительную величину ΔR , получим, что

$$\frac{\beta(\lambda_\omega, R + \Delta R) * \beta(\lambda_0, R)}{\beta(\lambda_\omega, R) * \beta(\lambda_0, R + \Delta R)} * e^{-2\tau_\varepsilon} \approx 1. \quad (10)$$

Влияние ширины линии зондирующего излучения на эффективность лидарных измерений исследовалось в [4, 6]. При этом спектральные функции $\xi(\lambda)$, $E(\lambda)$, $\sigma(\lambda)$ задавались гауссовским распределением. Однако контур линии поглощения газовых компонент в исследуемой области описывается лоренцевской кривой, что необходимо учитывать в условиях реального дистанционного зондирования. Тогда можно записать:

$$\xi(\lambda) = \xi_0 \frac{(\ln 2)^{1/2}}{\Delta_e \pi^{1/2}} \exp\left(-\frac{(\lambda_0 - \lambda)^2}{\Delta_e^2}\right), \quad (11)$$

где Δ_e – полуширина спектральной функции пропускания оптической системы лидара;

$$E(\lambda) = E_0 \frac{(\ln 2)^{1/2}}{\Delta_0 \pi^{1/2}} \exp\left(-\frac{(\lambda_0 - \lambda)^2}{\Delta_0^2}\right), \quad (12)$$

где Δ_0 – полуширина линии лазерного излучения на длине волны λ_0 ;

$$\sigma^A(\lambda) = \sigma^A \frac{\Delta_n}{\pi [(\lambda_n - \lambda)^2 + \Delta_n^2]}, \quad (13)$$

где λ_n – длина волны, соответствующая центру линии поглощения;
 Δ_n – полуширина линии поглощения молекул исследуемого газа.

Графическое представление величин Δ_e , Δ_0 , Δ_n показано на рис.1.

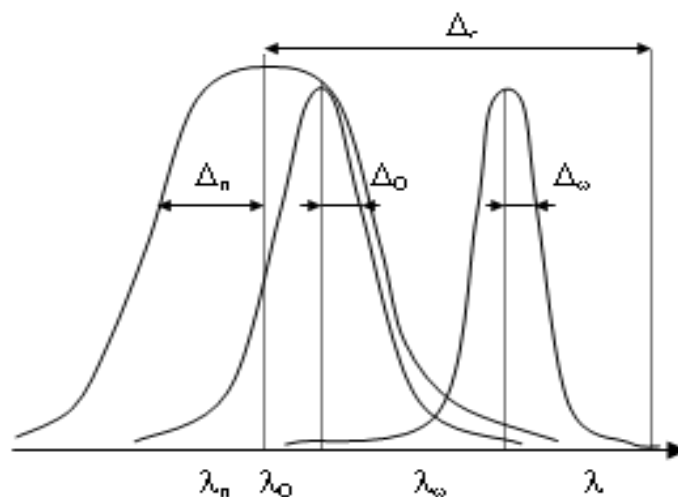


Рис. 1 – Спектральные характеристики излучения и поглощающих молекул

С учетом формул (10), (11), (12) и (13) и того, что для метода ДПР $\Delta_n \gg \Delta_0$, выражение (8) можно преобразовать к виду:

$$M(\Delta x) = \frac{E(\lambda_{\sigma}, R + \Delta R)E(\lambda_0, R)}{E(\lambda_0, R + \Delta R)E(\lambda_{\sigma}, R)} = \frac{\int_{\lambda_0 - \Delta_c}^{\lambda_0 + \Delta_c} \exp\left\{-\frac{(\lambda_0 - \lambda)^2}{\Delta_{\Pi}^2 \Delta_x^2} - \frac{2\tau_1 \Delta_0}{\Delta_x [(\lambda_{\Pi} \lambda)^2 + \Delta_{\Pi}^2]}\right\} d\lambda}{\int_{\lambda_0 - \Delta_c}^{\lambda_0 + \Delta_c} \exp\left\{-\frac{(\lambda_0 - \lambda)^2}{\Delta_{\Pi}^2 \Delta_x^2} - \frac{2\tau_2 \Delta_0}{\Delta_x [(\lambda_{\Pi} \lambda)^2 + \Delta_{\Pi}^2]}\right\} d\lambda}, \quad (14)$$

где $\Delta_x = \frac{\Delta_0}{\Delta_n}$ – отношение полуширины линии лазерного излучения к полуширине линии поглощения исследуемого газа,

$$\tau_1 = \int_0^R N(R) \sigma^{\lambda} dR; \quad (15)$$

$$\tau_2 = \int_0^{R+\Delta R} N(R) \sigma^{\lambda} dR, \quad (16)$$

где τ_1, τ_2 – оптическая толщина поглощения излучения.

Результаты моделирования в соответствии с выражением (14) для типичных характеристик лазерного излучения и газовых компонент представлены на рис. 2.

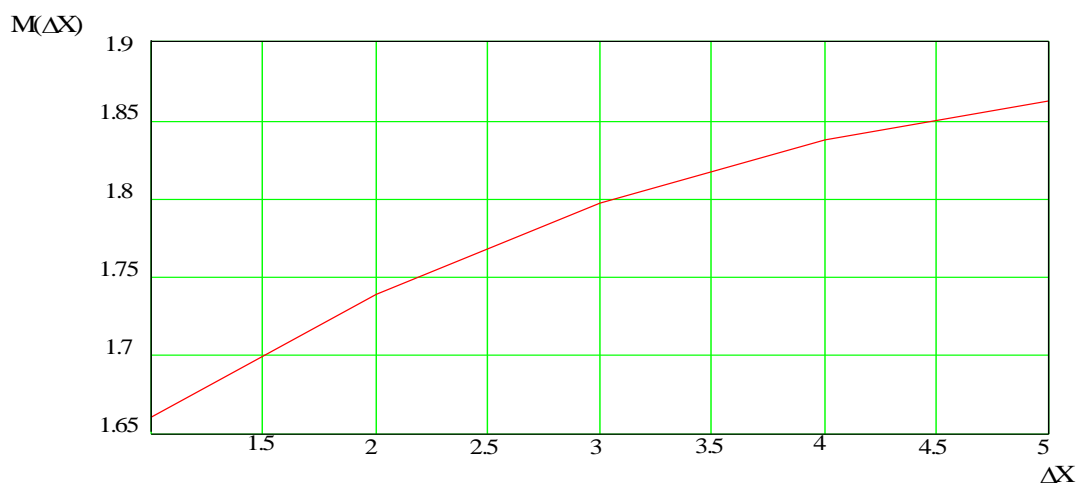


Рис. 2 – Зависимость точности измерений от ширины зондирующего излучения

Анализ графика показывает, что изменение соотношения полуширины лазерного излучения и полуширины линии поглощения исследуемого газа приводит к необходимости учета систематической ошибки измерений, связанной с конечной шириной линии лазерного излучения. Для высокоэффективных лидарных измерений это отношение (Δx) необходимо уменьшать.

Выводы. Анализ влияния ширины линии лазерного излучения на точность измерений параметров следа показал, что в исследуемой области преобладает лоренцевский контур линии поглощения молекул газа, обусловленный повышенной температурой и давлением в следе. Вследствие указанных причин ширина контура линии поглощения увеличивается. Это приводит к снижению требований к ширине линии зондирующего излучения.

В работе были проведены исследования влияния ширины линии лазерного излучения на эффективность лидарных измерений. В результате исследований получено выражение (14), которое характеризует точность проведения измерений в зависимости от соотношения ширины линии излучения и ширины контура поглощения.

Данное выражение характерно тем, что рассматривается лоренцевский контур линии поглощения, поскольку его уширение обусловлено столкновительными эффектами, вызванными повышением температуры и давления исследуемых газов. С уменьшением отношения ширины линии лазерного излучения к ширине контура линии поглощения точность лидарных измерений возрастает, что позволяет измерять проводить высокоточные концентрации РВ и ОВ.

Список использованной литературы

1. Аналітичний огляд стану техногенної та природної безпеки в Україні за 2015 рік [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.dsns.gov.ua/files/prognoz/report/2015/Glava_1.pdf.
2. Айрапетян В.С. Обнаружение и измерение параметров наркотических

- веществ с помощью перестраиваемого ИК-лазера / В. С. Айрапетян, Т. В. Маганакова // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2014. X Междунар. науч. конгр.: Междунар. науч. конф. «СибОптика-2014» (Новосибирск, 8 – 18 апреля 2014 г.): сб. материалов в 2 т. Т. 2. – Новосибирск: СГГА, 2014. – С. 199 – 204.
3. Набиев Ш.Ш. Современные тенденции развития методов дистанционного обнаружения радиоактивных и высокотоксичных веществ/ Ш. Ш. Набиев // Вестник РАЕН. Физика. – 2012. – Вып. 1. – С. 14 – 25.
 4. Зуев В. В. О точности дистанционного зондирования угарного газа с использованием 2-й гармоники ТЕА-CO₂ лазера / В. В. Зуев, А. А. Мицель, И. В. Пташник // Оптика атмосферы. – 1992. – Т.5. – Вып 9. – С. 970 – 977.
 5. Гейко П. П. Контроль концентрации отравляющих веществ лидаром дифференциального поглощения на основе CO₂-лазера. Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники / П. П. Гейко. – 2011. – Вып. 2-3 (24). – С. 31 – 35.
 6. Межерис Р. Лазерное дистанционное зондирование / Р. Межерис. – М.: Мир, 1987. – 550 с.

Abstract

INVESTIGATIONS OF THE INFLUENCE WIDTH OF THE LASER LINE ON THE EFFECTIVENESS OF LIDAR MEASUREMENTS OF RADIOACTIVE AND TOXIC SUBSTANCES

V. Romanyuk, S. Nesterenko, M. Kiriienko, O. Ivanova

Currently, the world has considerable quantities of hazardous chemicals that when released into the environment in emergency situations (ES) may pose a threat of mass destruction of people, cause damage to nature, contaminating large areas. In Ukraine there are 931 object, which are stored or used in the production activities 308.07 ths. Tons of hazardous chemicals (OHV), including 4.08 ths. Tons of chlorine, 202.66 thousand. Tons of ammonia and 101.33 thousand. tonnes of other hazardous chemicals. As a consequence, in case of emergency situations (ES) in the affected area of the chemical can get more than 250 areas, where about 20 million people. Chemical hazards and creates waste accumulation, the total amount of which exceeds 35 billion tons. Therefore, control of the state of ecological conditions near the major technological systems in order to prevent large-scale accidents is an important inter-state problem. However, ongoing environmental protection measures at these facilities and landfills for the destruction of highly toxic materials are insufficient. There is a strong possibility of accidental releases of highly molecular compounds produced during reprocessing of nuclear fuel, disposal of weapons-grade uranium and plutonium, the radioactive inventory (PB), poison (s) of highly toxic substances (SDYAV), etc.

Therefore, the relevance of the tasks of operational control of the gas and aerosol emissions of hazardous energy and industrial objects increases dramatically. First of all we are talking about the possible consequences of accidents on the production of nuclear fuel cycle (NFC), associated not only with the RV emissions, but

also a number of highly toxic compounds. Finally, in recent years one of the most pressing problems of the state becomes a struggle against various manifestations (including with radiation, chemical, etc.) terrorist activities.

In this paper we currently available active remote sensing (monitoring) PB and OB based on the achievements of absorption spectroscopy. Investigations of the influence of the width of the laser line on the effectiveness of lidar measurements. They show that the change in the ratio of half-width of the laser line and the half-width of the absorption lines of the gas under investigation leads to the need to consider a systematic measurement error due to the finite width of the laser radiation.

Keywords: remote sensing, half-width of the laser radiation absorption line.

Анотація

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ШИРИНИ ЛІНІЇ ЛАЗЕРНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ ЛІДАРНИХ ВИМІРІВ РАДІОАКТИВНИХ І ОТРУЙНИХ РЕЧОВИН

Романюк В.А., Нестеренко С.В., Кірієнко М.М., Іванова О.П.

В даний час в світі зосереджені значні кількості небезпечних хімічних речовин, які при попаданні в навколишнє середовище в умовах надзвичайних ситуацій (НС) можуть створювати загрозу масового ураження людей, завдавати шкоди природі, заражаючи значні території. В Україні налічується 931 об'єкт, де зберігаються або використовуються у виробничій діяльності 308,07 тис. т небезпечних хімічних речовин (НХР), в тому числі 4,08 тис. т хлору, 202,66 тис. т аміаку і 101,33 тис. т інших небезпечних хімічних речовин. Як наслідок, в разі надзвичайних ситуацій в зону хімічного ураження можуть потрапити більше 250 районів, де проживає близько 20 млн чоловік. Хімічну небезпеку створює і накопичення відходів, загальний обсяг яких перевищує 35 млрд т. Тому контроль за станом екологічної обстановки поблизу великих технологічних комплексів з метою запобігання великомасштабних аварій є важливою міждержавної проблемою. Однак проведені заходи по захисту навколишнього середовища на цих підприємствах і полігонах по знищенню високотоксичних матеріалів недостатні. Існує велика ймовірність аварійних викидів високотоксичних молекулярних сполук, що утворюються в процесі переробки ядерного палива, утилізації збройового урану і плутонію, запасів радіоактивних (РР), отруйних (ОР), сильнодіючих отруйних речовин (СДОР) і т.д.

Тому актуальність завдань оперативного контролю за газовими і аерозольними викидами небезпечних енергетичних і промислових об'єктів різко зростає. В першу чергу мова йде про можливі наслідки аварійних ситуацій на виробництвах ядерного паливного циклу (ЯПЦ), пов'язаних не тільки з викидами РР, а й ряду високотоксичних сполук. Нарешті, в останні роки однією з найактуальніших державних завдань стає боротьба з різними проявами (в т.ч. з радіаційними, хімічними і т.д.) терористичної діяльності.

У даній роботі розглянуті можливості наявних на сьогоднішній день активних методів дистанційного зондування (контролю) РР і ОР, засновані на

досягненнях спектроскопії поглинання. Проведено дослідження впливу ширини лінії лазерного випромінювання на ефективність лідарних вимірів. Вони показують, що зміна співвідношення напівширини лінії лазерного випромінювання і напівширини лінії поглинання досліджуваного газу призводить до необхідності врахування систематичної помилки вимірювань, пов'язаної з кінцевою шириною лінії лазерного випромінювання.

Ключові слова: дистанційне зондування, напівширина лінії лазерного випромінювання, лінія поглинання.